

董俊巧, 刘星才, 李占玲. 基于灰水足迹的天山北坡地区水资源利用可持续性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 69-78. DONG J Q, LIU X C, LI Z L. Assessment of sustainability of water resource utilization on the northern slope of Tianshan Mountains based on grey water footprint[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 69-78. (in Chinese)

基于灰水足迹的天山北坡地区水资源 利用可持续性评价

董俊巧^{1,2,4}, 刘星才^{2,3}, 李占玲^{1,4}

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学, 北京 101408; 4. 中国地质大学(北京)水利部地下水保护重点实验室(筹), 北京 100083)

摘要: 基于 2006—2020 年天山北坡的 GDP、水资源总量、供水量、化学需氧量(COD)与氨氮(NH₃-N)排放量等基础数据, 采用灰水足迹方法, 对该地区水资源可持续利用进行综合评价。结果显示: 天山北坡各城市灰水足迹在空间上呈现中部高于东西部的分布特征。在时间上, 灰水足迹经历了先升后降的变化趋势, 2016 年相比 2006 年整体上升了 11.56%, 而 2020 年又较 2016 年下降了 23.30%。各城市间灰水足迹的组成存在显著差异。多数城市以农业灰水足迹为主, 而乌鲁木齐市生活灰水足迹也占有较大比重, 石河子市的工业灰水足迹占比最大。天山北坡整体及部分城市的水资源可持续利用状态在 2014—2016 年出现明显好转, 水资源可持续利用程度指数稳步增长。然而, 博州与塔城地区指数增长速度相对较慢, 表明该地区仍面临较大压力, 水资源可持续利用性需进一步提升。评估结果可为当地水资源管理提供科学依据, 有助于推动该地区水资源可持续利用。

关键词: 水资源; 水资源利用; 可持续性; 灰水足迹; 天山北坡

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0007

随着我国经济的快速增长, 各行业对水资源的需求量不断上升^[1]。因此, 开展水资源可持续性研究变得尤为迫切。“可持续发展”最早在 1987 年的 *Our Common Future* 报告中被提出^[2], 并随着时间的推移逐渐被广泛接受和推广。20 世纪中期, 随着水资源问题的日益凸显, 这一概念开始被应用于水资源领域, 从而形成了“水资源可持续发展”的理念。水资源的可持续性受到水质和水量 2 个方面的共同影响。在众多水质评价方法中, 灰水足迹方法因其能够同时考虑水质和水量因素而受到广泛应用。

灰水足迹的概念最初由 Hoekstra 与 Chapagain 在 2008 年提出, 并经过不断的完善和发展, 形成了一个得到广泛认可的定义: 以现有水质环境标准为基准, 计算稀释一定污染物负荷需要的水量^[2-4]。该方法已被广泛应用于农药、采矿、微生物和畜牧等领域的水环境影响评价^[5-9], 并且有关其特征的研究

也相当丰富^[7]。Liu 等^[10]以全球玉米灰水足迹为例, 研究了灰水足迹的水质标准、污染物种类以及空间分辨率 3 个影响因素, 并提出了灰水足迹适用的水质标准和空间分辨率。此外, 相关研究^[11-14]发现: 中国人均灰水足迹随驱动因素的变化而显著变化, 且存在时空差异, 其空间差异的驱动因素与经济发展和污染物类型密切相关; 城镇化水平与第二、三产业占比被视为灰水足迹变化的驱动要素, 而人均 GDP、灰水足迹强度和外商直接投资则被视为抑制要素^[15]; 全国各省之间的灰水足迹存在空间关联^[16], 其空间关联度与经济发展方式、作物的耗水特点和种植结构有关^[17], 而不同地区的灰水足迹荷载系数与其驱动因素和灰水足迹的转移方式关系密切^[18], 且灰水足迹重心呈现出由东北向西南的迁移趋势^[19]。研究还发现, 中国的经济发展对灰水足迹的时空演变规律有显著影响^[19], 孙诗阶等^[20]观察到农业灰水

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-10-24 网络出版时间: 2024-10-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241028.1507.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271032); 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0806)

作者简介: 董俊巧(1999—), 女, 河北石家庄人, 主要从事水文与水资源问题研究。E-mail: dong2015jq2018@163.com

通信作者: 刘星才(1984—), 男, 江西吉安人, 副研究员, 主要从事水文水资源、气候变化研究。E-mail: xingcailiu@igsrr.ac.cn

足迹与经济增长之间的协调关系正逐步演进至强脱钩态势,这一转变显著反映出农业经济体系与农业水环境之间的和谐共生程度有了大幅提升。卢先智等^[21]研究则表明,长江经济带灰水足迹总量展现出波动性下降的趋势,同时,灰水足迹与 GDP 增长之间的脱钩关系总体上实现了由弱脱钩到强脱钩的积极转变,这标志着该区域内水环境保护与经济发展之间的协调性得到了显著提升。此外,农业灰水足迹及其效率的变化对其与经济增长的脱钩关系也有一定的影响^[22-25]。

灰水足迹方法在水资源可持续评价中扮演着至关重要的角色。该方法通过综合考虑水质和水量因素,突破了传统单一维度评价的局限,为水资源的可持续利用提供了更为全面的评价体系^[26]。在全国范围内,从省市级到地区级乃至流域级的不同维度,灰水足迹方法已被广泛应用于水资源的评估,同时考虑了水生态足迹与水生态承载力对水资源可持续性的影响,使得水资源的可持续利用评价更加客观和全面^[27-32]。

天山北坡地区,作为新疆的经济核心,是西北地区重要的城市群之一。这里集中了现代工业、农业、交通和教育科技等关键领域,对新疆乃至整个西北地区的经济发展起到了显著的推动作用。然而,伴随经济的持续增长,该地区用水量呈现出逐年攀升态势,导致水资源供需之间的矛盾愈发尖锐,成为亟待解决的关键问题。特别是天山北坡地区,近 60 年(截止 2023 年)水资源的时空分布不均,地下水的过度开采已经对当地的经济发展和生态系统的调节功能造成了严重限制。现有研究^[33]表明,该地区的水资源开发已达到临界程度,水资源面临较大规模的压力。此外,已有研究^[34]从水质和水量两个方面对水资源安全进行了评估,指出天山北坡水资源整体处于基本安全等级。但是总体而言,涉及本地区水资源可持续利用的研究相对较少。因此,本研究将灰水足迹方法与水资源可持续利用相结合,从水资源的“质”和“量”两个维度选取指标,通过全面评估水质状况与水量的动态变化对水资源可持续性的综合影响,旨在为水资源的科学规划与可持续管理策略的制定提供坚实而可靠的依据。

1 研究区概况

以天山北坡作为研究区域,该区域涵盖了乌鲁木齐市、克拉玛依市、哈密地区的北部、昌吉回族

自治州(简称昌吉州)、博尔塔拉蒙古自治州(简称博州)、塔城地区和石河子市 7 个地区。天山北坡位于新疆天山以北,准噶尔盆地南缘,在 $79^{\circ}48'E \sim 96^{\circ}30'E$, $42^{\circ}30'N \sim 47^{\circ}30'N$ 。区内地势南高北低,自南向北地形依次为山区、平原与沙漠,高程在 154~5 433 m。

天山北坡地区位于温带大陆性半干旱气候带,其气候特征为冬季寒冷、夏季炎热,以及显著的年度和日间温差。2006—2020 年该地区的年平均气温低于 $10^{\circ}C$,同时期的年均降水量仅为 201.5 mm,气候干燥。2006—2020 年该地区的多年平均水资源总量为 141.6 亿 m^3 ,而同期的用水总量已达到 117.2 亿 m^3 ,接近其水资源总量的 83%。此外,水资源在时间和空间上的不均匀分布进一步加剧了供需之间的矛盾,在农业灌溉和城市供水方面矛盾较突出。

2 数据与方法

2.1 数据来源

基础数据包括国内生产总值(GDP)、水资源总量、供水量、化学需氧量(COD)与氨氮(NH_3-N)等,主要来源于 2006—2020 年的《新疆水资源公报》《新疆环境公报》《新疆统计年鉴》。部分关键指标数据是通过计算得出的,而对于数据缺失的情况则采用线性插值法进行补充。根据数据的可获得性以及指标的代表性,选择万元 GDP 水耗、水资源开发率、灰水足迹衍生指标灰水经济生产率与灰水足迹荷载系数等几个指标进行计算和评价。由于数据获取的限制,本研究未能包括 2013 年的计算结果,这可能会对研究的连续性和趋势分析产生一定影响。

在处理经济相关数据时,考虑到研究区域与实际行政区划边界可能存在的差异,分析时对所有经济数据按照人口比例进行了修正,以确保数据的准确性。同样,水资源等相关数据也根据面积比例进行了相应的修正。

在污染物排放标准的采用上,依据《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的一级排放标准,将化学需氧量(COD)和氨氮(NH_3-N)的标准排放质量浓度分别设定为 60 mg/L 和 15 mg/L。在评估过程中,各类污染物的自然本底质量浓度均假定为 $0\text{ kg}/m^3$ 。氮肥施用量的数据参考了《新疆统计年鉴》,而氮肥淋失率则采用了全国平均的氮肥流失率 7% 作为参考值。

2.2 灰水足迹

灰水足迹是用于计算淡水污染的指标,反映了人类活动所造成的水污染强度。本研究从农业、工业和生活灰水足迹三部分来计算研究区灰水足迹。

2.2.1 农业灰水足迹

农业污染物主要是化肥与农药。由于农药污染数据不易获取,因此选取氮肥与复合肥作为农业灰水足迹污染物,具体计算公式为

$$G_{agr} = \frac{\alpha \times (A_n \times C_n + A_c \times C_c)}{C_{max} - C_{nat}} \quad (1)$$

式中: G_{agr} 表示农业灰水足迹, m^3/a ; α 表示氮肥流失率, $\alpha = 7\%$; A_n 和 A_c 分别表示氮肥和复合肥的施用量, kg/a ; C_n 和 C_c 分别为氮肥与复合肥的氮含量 46% 和 30% ^[29]; C_{max} 表示污染物标准质量浓度, kg/m^3 ; C_{nat} 表示受纳水体本底质量浓度, kg/m^3 。

天山北坡养殖业较为发达,放牧和畜禽舍清洗造成的水体氮污染不容忽视。各类畜禽排泄物是养殖业灰水足迹的污染源,现选取《新疆统计年鉴》中统计的各类畜禽作为养殖业排污的对象(主要为牛、马、驴、猪、羊和家禽)。养殖业中未被处理回用的畜禽排污部分,计算公式为

$$G_{bre} = \sum_i^n G_{bre,i} = \frac{L_i \times E_{xc} \times (1 - P_r) \times N_i}{C_{max} - C_{nat}} \quad (2)$$

式中: G_{bre} 为养殖业灰水足迹, m^3/a ; $G_{bre,i}$ 分别为各类畜禽导致的灰水足迹, m^3/a ; L_i 为各地区畜禽年末存栏量, 头/只; E_{xc} 、 P_r 和 N_i 分别表示畜禽年均排泄物产量、回用处理率和氮流失系数^[29]。

2.2.2 工业灰水足迹

化学需氧量(COD)和氨氮(NH_3-N)是常用的工业水污染指标,因此将其作为工业污染物。具体计算公式为

$$G_{ind,i} = \frac{L_{ind,i}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (3)$$

$$G_{ind} = \max(G_{ind(COD)}, G_{ind(NH_3-N)}) \quad (4)$$

式(3)和(4)中, $G_{ind,i}$ 表示化学需氧量或氨氮工业灰水足迹, m^3/a ; $L_{ind,i}$ 表示的化学需氧量或氨氮的工业排放负荷, kg/a ; G_{ind} 表示工业灰水足迹, m^3/a 。

2.2.3 生活灰水足迹

生活污染是由人类生活产生的污染物排放到水体所造成的污染,据《新疆统计年鉴》记载,生活污水主要污染物为化学需氧量和氨氮。其计算公式为

$$G_{lif,i} = \frac{L_{lif,i}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (5)$$

$$G_{lif} = \max(G_{lif(COD)}, G_{lif(NH_3-N)}) \quad (6)$$

式(5)和(6)中: $G_{lif,i}$ 表示化学需氧量或氨氮生活灰水足迹, m^3/a ; $L_{lif,i}$ 表示化学需氧量或氨氮的生活排放负荷, kg/a ; G_{lif} 表示生活灰水足迹, m^3/a 。

2.2.4 区域灰水足迹

区域灰水足迹是指整个研究区域灰水足迹的总和,用 G_t 表示。

2.3 水资源可持续利用

借鉴王雅晴等^[29]所构建的水资源可持续利用评价指标体系,以灰水足迹及其衍生指标为基础,对研究区的水资源可持续利用状况进行全面评估。该指标体系由效率和压力两大核心部分组成,旨在综合反映水资源利用的经济效益和环境影响。效率指标包括万元 GDP 水耗和灰水经济生产率,压力指标包括水资源开发率和灰水足迹荷载系数。四类指标根据权重和得到综合评价指标水资源可持续利用程度指数 E 。

2.3.1 水资源开发率和万元 GDP 水耗

水资源开发率为水资源供水量与水资源总量的比值,用 W_e 表示,用于衡量水资源开发利用程度,与人均水资源量相比其包含生态用水,考虑更加全面。其数值越大,表示水资源开发利用程度越大,水资源面临压力越大,水资源可持续利用程度越低。计算公式为

$$W_e = \frac{W_s}{W_t} \quad (7)$$

式中: W_e 表示水资源开发率; W_s 表示水资源供水量, m^3/a ; W_t 表示水资源总量, m^3/a 。

万元 GDP 水耗是水资源供水量与 GDP 的比值,用 W_c 表示,用于表征单位经济增长与其所需水资源量关系,数值越大,单位经济增长所需水资源量越大,面临水资源压力越大,水资源可持续利用程度越低。计算公式为

$$W_c = \frac{W_s}{V_{GDP}} \quad (8)$$

式中: W_c 表示万元 GDP 水耗, $m^3/万元$; V_{GDP} , 万元。

2.3.2 灰水经济生产率与荷载系数

灰水经济生产率为 GDP 与区域灰水足迹的比值,用 E_c 表示。用于表征产生单位灰水足迹的经济增长程度,数值越大,表明单位灰水所获经济效益越大,其对水资源可持续利用呈正向影响。计算公式为

$$E_c = \frac{V_{GDP}}{G_t} \quad (9)$$

式中: E_c 表示灰水经济生产率, 元/ m^3 。

荷载系数为区域灰水足迹与水资源总量的比值, 用 P_c 表示。用于表征水资源污染压力程度, 荷载系数越大, 表明用于稀释灰水足迹的水资源量越大, 水资源面临的污染压力越大, 水资源可持续利用程度越低。荷载系数若大于 1, 则说明该地区水资源量已不足以支撑灰水足迹的稀释。计算公式为

$$P_c = \frac{G_t}{W_t} \quad (10)$$

式中: P_c 表示灰水足迹荷载系数, 无量纲。

2.3.3 水资源可持续利用评价

利用极差标准化方法对以上 4 个指标进行标准化处理。其中灰水经济生产率为正向指标, 其余指标为负向指标。正向指标值越大结果越优, 负向指标反之。计算公式为

对于正向指标:

$$X_i = \frac{A_i - A_{i,\min}}{A_{i,\max} - A_{i,\min}} \quad (11)$$

对于负向指标:

$$X_i = \frac{A_{i,\max} - A_i}{A_{i,\max} - A_{i,\min}} \quad (12)$$

式(11)和(12)中: X_i 为第 i 项指标的标准化值, A_i 为第 i 项指标的原始值; $A_{i,\max}$ 为同一指标原始值中的最大值, $A_{i,\min}$ 为同一指标原始值中的最小值。

继而采用变异系数法计算各指标权重。计算公式为

$$R_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (X - \bar{X})^2}}{\bar{X}} \quad (13)$$

$$w_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (14)$$

式(13)和(14)中: R_i 为第 i 种指标的标准差与均值的比值; m 为样本数; X 为第 i 种指标标准化值; $\bar{X}$ 为第 i 种指标的样本均值。 w_i 为第 i 种指标权重, $n=4$ 。

最后采用加权求和方法计算水资源可持续利用程度指数 E 。数值越大表明水资源可持续利用程度越高。计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^n w_i \times X_i \quad (15)$$

式中: E 表示水资源可持续利用程度指数。

3 结果分析与讨论

3.1 灰水足迹分析

天山北坡地区在 2006—2020 年的多年平均灰水足迹为 69.97 亿 m^3 。其中, 塔城地区以多年平均灰水足迹 23.44 亿 m^3 位居首位, 其次是昌吉州(22.30 亿 m^3)、乌鲁木齐(7.55 亿 m^3)、博州(7.29 亿 m^3)、石河子市(5.48 亿 m^3)和哈密北部(2.69 亿 m^3)。相比之下, 克拉玛依市的多年平均灰水足迹最小, 仅为 1.22 亿 m^3 。从空间分布来看, 天山北坡地区的灰水足迹呈现出中部高于东西部的特征(图 1)。

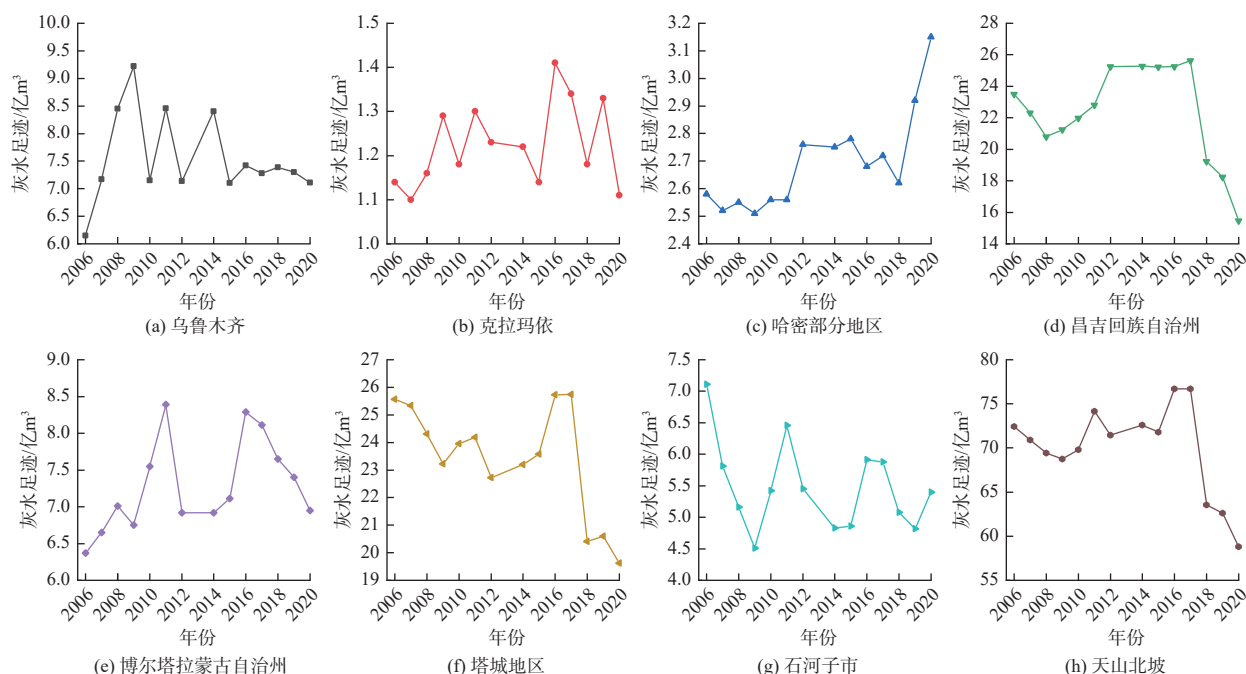


图 1 天山北坡地区灰水足迹

Fig. 1 Grey water footprint of the northern slope of the Tianshan Mountains

图1显示天山北坡各城市灰水足迹在不同时间段内存在显著的时空差异。在2016年之前,整体灰水足迹的变化相对较为平缓。2016年和2017年灰水足迹达到峰值,为76.69亿 m^3 ,随后在2020年降至最低值58.82亿 m^3 。具体到各个地区,2016年之前灰水足迹的年际波动较大,而2016年之后,大部分地区的灰水足迹呈现下降趋势,且年际间的波动幅度有所减弱。

天山北坡工业灰水足迹逐渐减少,农业灰水足迹逐渐增多(图2)。在空间分布上,昌吉州、博州、

哈密北部和塔城地区由于农业较为发达,农业灰水足迹占主导地位,占比高达80%以上。相比之下,乌鲁木齐市的生活与农业灰水足迹占比相当,工业灰水足迹较小。克拉玛依市的生活与工业灰水足迹逐渐减少,而农业灰水足迹逐渐增多。需注意的是由于统计年鉴未包含石河子市的氮肥施用量等有关农业数据,本研究并未计算其农业灰水足迹,因此文中石河子市灰水足迹只做纵向比较,不与其他地区相比。

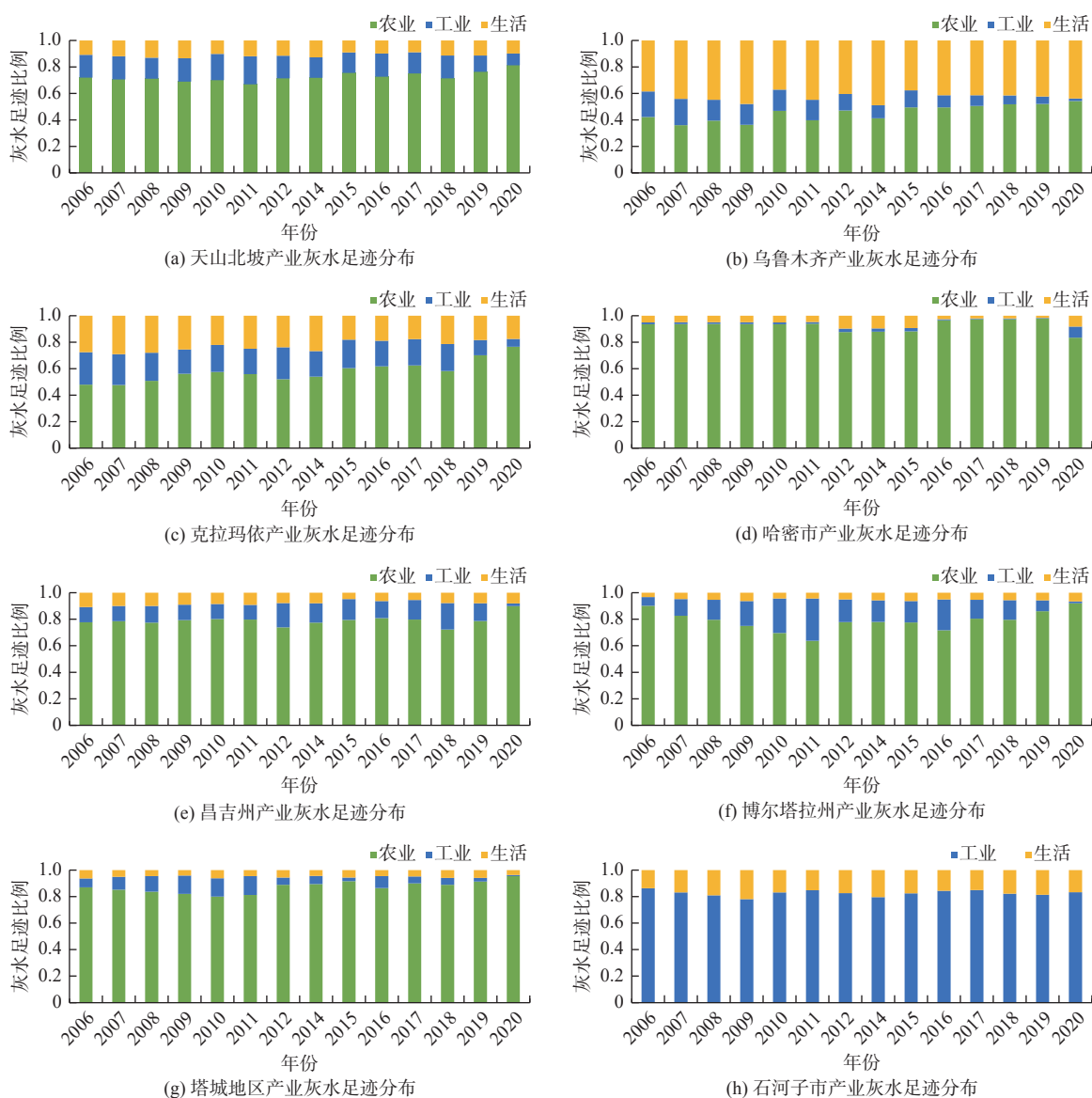


图2 各城市灰水足迹占比柱状

Fig. 2 Column chart of the proportion of gray water footprint in each city

3.2 水资源可持续利用分析

根据采用的评估方法,计算得出研究区的万元GDP水耗、灰水经济生产率、水资源开发率和灰水足迹荷载系数的权重分别为0.20、0.34、0.23和0.23。

这些权重反映了各指标在水资源可持续利用评价中的重要性,且各地区指标权重存在细微差异。

天山北坡地区的灰水经济生产率平均值为63.14元/ m^3 (表1),2006—2020年该地区的灰水经

济生产率呈现持续增长趋势。其中,克拉玛依市的灰水经济生产率最高,达到 567.43 元/ m^3 ,而塔城地区最低,仅为 19.17 元/ m^3 。天山北坡的水资源开发率呈现上升趋势,而万元 GDP 水耗则呈现下降趋势。水资源开发率的上升反映了供水量的增加,但同时也意味着水资源面临的压力增大,水资源的可持续利用程度可能有所下降。相反,万元 GDP 水耗的下降表明单位经济增长所需的水量减少,这可能意味着水资源利用效率的提升,水资源压力相应减小,水资源的可持续利用程度有所提升。尽管天山北坡整体的灰水足迹荷载系数未超过 1,表明水资源总体上能够支撑灰水稀释,但克拉玛依市和石河子市的荷载系数分别高达 2.61 和 38.24。高荷载系数意味着这些地区的水资源已经不足以支撑当前的灰水稀释需求,水资源面临严峻挑战,存在较大压力。

表 1 天山北坡地区水资源利用状况
Tab. 1 Water resources utilization in northern slope
of Tianshan Mountains

年份	万元GDP 水耗/ m^3	灰水经济生产 率/(元· m^{-3})	水资源 开发率	灰水足迹 荷载系数	水资源可持续 利用程度指数E
2006	640.71	20.54	0.70	0.50	0.31
2007	538.95	24.62	0.63	0.44	0.45
2008	457.60	29.96	0.83	0.56	0.30
2009	398.93	37.25	0.83	0.52	0.39
2010	377.16	36.99	0.60	0.40	0.62
2011	316.41	44.22	0.86	0.57	0.38
2012	292.22	56.73	1.00	0.56	0.38
2014	241.85	70.72	1.14	0.62	0.33
2015	215.68	79.57	0.87	0.47	0.63
2016	215.68	72.87	0.71	0.42	0.73
2017	205.14	72.20	0.77	0.48	0.64
2018	179.61	96.50	0.90	0.49	0.67
2019	163.64	112.77	0.91	0.46	0.75
2020	162.61	129.05	1.05	0.47	0.74
平均	314.73	63.14	0.84	0.50	0.52

这 4 个指标相互关联并共同影响着水资源的可持续利用状况。在它们的综合作用下,天山北坡的水资源可持续利用程度指数呈现上升趋势,表明水资源的可持续利用状态正在逐步改善。然而,面对部分地区水资源的高压态势,需要采取有效措施,如提高用水效率、推广节水技术、优化水资源配置和管理,以确保水资源的长期可持续利用。

天山北坡各地区 2006—2020 年的水资源可持

续利用程度整体呈现上升趋势(图 3)。石河子市的表现尤为显著,其水资源可持续利用程度指数从 2006 年的 0.05 显著提高至 2014 年后的 0.70 以上。乌鲁木齐的水资源可持续利用程度也经历了显著变化,以 2014 年为关键转折点。2014 年以前,该市的指数多在 0.2~0.4 波动,而 2014 年后,指数显著提升至 0.7~0.8。克拉玛依、昌吉州的水资源可持续利用状态同样在 2014 年出现了积极的变化,其后指数逐步增长。哈密北部地区则从 2015 年开始,其可持续利用指数从 0.4 迅速提升至 0.6。这一转变可能反映了这些地区在水资源保护和利用效率方面采取了有效的措施。相比之下,博州与塔城地区 2006—2020 年的水资源可持续利用程度指数变化较为平稳,但从 2014 年起,增长速度有所加快。这可能与区域发展战略的调整或水资源管理措施的加强有关。尽管天山北坡地区的水资源总量持续减少,但水资源可持续利用程度指数的增长仍然缓慢。这表明在水资源保护和利用方面仍面临挑战。

3.3 讨论

天山北坡地区灰水足迹的空间分布不均主要与人类活动强度、用水效率和产业结构等因素密切相关。具体来说,昌吉州与塔城地区由于人口密度较大,农业活动更为集中,导致这些地区的人均用水强度显著高于克拉玛依等地区。例如,昌吉州与塔城地区的农业用水强度是克拉玛依的数倍,这直接导致了这两个地区农业灰水足迹的占比更大,而克拉玛依等地区的农业灰水足迹相对较小。因此,在人类活动、用水强度与产业结构的综合作用下,昌吉州等地区的灰水足迹偏高,而克拉玛依等地区的灰水足迹偏小。

各产业灰水足迹的变化趋势与其产业结构紧密相关。昌吉州、博州、哈密北部和塔城 4 个地区的第一产业 GDP 占比较高,这表明这些地区的经济活动以农业为主,因此农业灰水足迹最多。相比之下,乌鲁木齐由于人口密度较大,人类活动更为密集,生活用水强度较大,而第二产业 GDP 占比不足 30%,这导致其灰水足迹主要由农业和生活用水构成。克拉玛依的情况则有所不同,其第二产业 GDP 占比从 2006 年的 88.5% 下降至 2020 年的 68.8%,而第一产业 GDP 占比在同一时期内增长了 3 倍,这一变化导致了克拉玛依农业灰水足迹的增长,而工业与生活灰水足迹的比例相应下降。

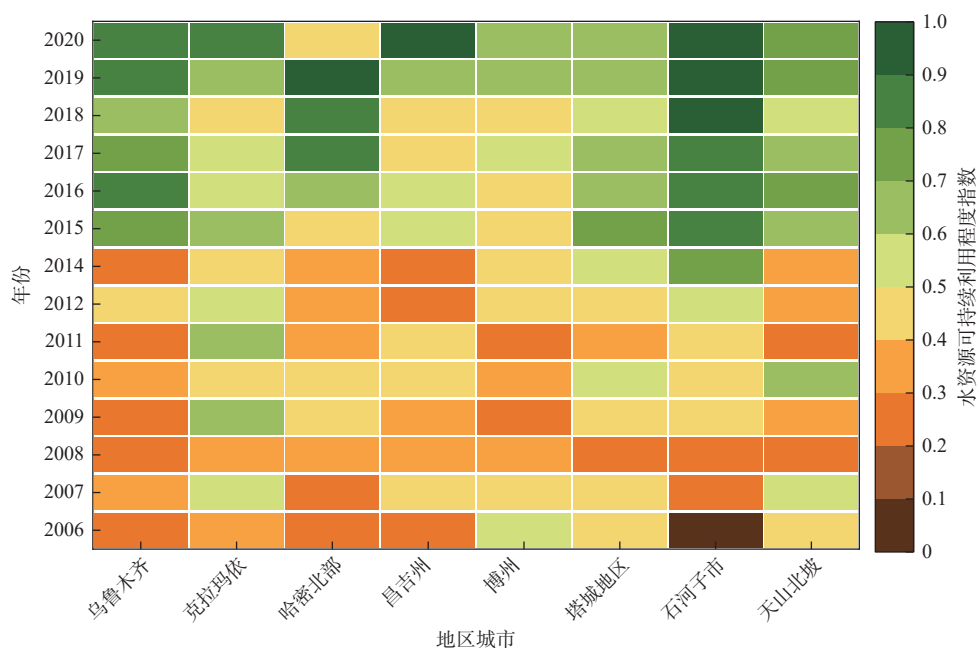


图3 天山北坡水资源可持续利用程度

Fig. 3 Sustainability of water resources utilization on the northern slope of Tianshan Mountains

与其他研究相比,本研究得出的人均灰水足迹结果整体偏大。以多年平均结果为例,姜秋香等^[12]的研究显示新疆 2000—2014 年人均灰水足迹为 $600.45 \text{ m}^3/\text{人}$,而孙才志等^[13]的研究计算得出新疆 1998—2012 年人均灰水足迹为 $598.64 \text{ m}^3/\text{人}$ 。本研究计算的天山北坡 2006—2020 年人均灰水足迹为 $676.74 \text{ m}^3/\text{人}$ 。研究区域和时段的不同可能是导致这些研究结果存在差异的主要原因。此外,与孙才志等的研究相比,本研究增加了养殖业灰水足迹的考量,且在部分灰水足迹的计算中所选污染物或污染源存在差异,以及部分数据的缺失,这些因素都可能导致结果的差异。

石河子市水资源可持续利用各项指标与其他地区相比变化较大,除石河子市未计算农业灰水足迹外,还存在其他原因。如克拉玛依 GDP 远高于石河子市,2006—2020 年克拉玛依 GDP 是石河子市 GDP 的 2~7 倍,导致石河子市与克拉玛依灰水经济生产率计算结果存在较大差异。石河子市工业发达,工业灰水足迹较大,但当地水资源量很少,主要依靠外部引水,由此导致石河子市的荷载系数较大。石河子市灰水足迹计算偏小是其水资源可持续利用程度指数变化较大的主要原因。

天山北坡地区的灰水足迹和水资源可持续利用状况在不同年份之间呈现出显著的波动,特别是在 2014—2016 年出现了转折迹象。这种波动可能与多种因素有关,包括环境治理政策的实施和节水措

施的推广。为了深入理解这些变化的原因,需要进一步收集和分析相关数据。其中,可能的原因之一是新疆环境治理与节水政策的变化。例如,2012 年新疆环境厅颁布《新疆维吾尔自治区环境保护“十二五”规划》,确定以“环保优先、生态立区”和“资源开发可持续、生态环境可持续”为发展统领。2017 年的《新疆维吾尔自治区环境保护“十三五”规划》进一步明确了生态优先和绿色发展的指导思想,并总结了“十二五”期间环保任务的完成情况。到 2015 年,环境空气质量达标,饮用水源质量提升,城镇污水处理率显著提高,主要污染物排放强度大幅下降,这些成就有助于减少灰水足迹。具体表现为,饮用水源质量与 2010 年相比提高了 4.9%,城镇污水处理率达到 81.06%,全区二氧化硫、氮氧化物、化学需氧量、氨氮排放强度分别下降 38.3%、36.8%、41.2% 和 42.0%。因此天山北坡及各地区灰水足迹自 2016 年开始整体出现波动下降变化。

2022 年发布的新疆环境保护“十四五”规划继续强调了节水型社会的建设目标,并提出了农业节水增效、工业节水减排、城镇节水降损减耗等重点任务。这些措施预计将进一步降低灰水足迹,提升水资源的可持续利用程度。

针对天山北坡地区当前的水资源可持续利用问题,结合“十四五”规划的内容,当地政府可采取以下措施:首先,加大宣传力度,提高公众的节水意识,推广节水技术和方法,以提高水资源的利用效率。

其次,调整和优化产业结构,严格控制污染物排放,提高污水处理率,从而在水资源的“质”和“量”2个方面提升水资源的可持续性。通过这些综合措施的实施,天山北坡地区有望在水资源管理和保护方面取得更大的进展,确保水资源的长期可持续利用。

4 结论

本研究采用灰水足迹方法,结合灰水足迹及其衍生指标构建了评价体系,计算了水资源可持续利用程度指数,对天山北坡地区的水资源状况进行了综合评价,得出以下结论:

天山北坡地区灰水足迹在空间上呈现出中部高于东西部的分布特征,具体表现为 14.75 亿~22.22 亿 m^3 。在时间序列上,灰水足迹经历了先升后降的变化趋势,2016 年相比 2006 年上升了 11.56%,而 2020 年又较 2016 年下降了 23.30%。除了石河子市与哈密北部在 2020 年灰水足迹有所回升外,其他地区的灰水足迹整体呈现波动下降的趋势。这种变化可能与区域水资源管理政策、节水措施的实施以及产业结构的调整有关。

在工业与农业灰水足迹的比较中,天山北坡地区的工业灰水足迹呈现逐渐减少的趋势,而农业灰水足迹则逐渐增多。这一现象在不同地区之间存在显著差异。昌吉州、博州、哈密北部和塔城地区由于农业较为发达,农业灰水足迹占主导地位,占比高达 80%。相比之下,乌鲁木齐的生活与农业灰水足迹占比较高,工业灰水足迹相对较小。克拉玛依的生活与工业灰水足迹逐渐减少,而农业灰水足迹则呈现增多趋势。

天山北坡地区整体以及部分城市的水资源可持续利用状态在 2014—2016 年出现了明显的好转,水资源可持续利用程度指数呈现稳步增长。然而,博州与塔城地区的水资源可持续利用程度指数增长速度相对较慢,这表明研究区仍然面临着较大的水资源压力,水资源的可持续利用性需要进一步提升。

目前,灰水足迹方法已成为评估水资源可持续性利用的重要工具。但由于不同研究区的具体情况不同,受当地数据获取难易程度的影响,以及所选取的主要污染物的差异,计算结果可能会有所不同。为了提高研究的准确性和可比性,未来的研究应当考虑统一数据来源和计算方法,并尽可能地填补数据缺失,以更准确地评估水资源的可持续性。

此外,未来的研究还应关注气候变化、人口增长和经济发展等因素对水资源可持续性的影响。

参考文献:

- [1] ZHOU F, BO Y, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(14): 7702-7711. DOI: 10.1073/pnas.1909902117.
- [2] 左其亭. 水资源可持续利用研究历程及其对我国现代治水的贡献 [J]. *地球科学进展*, 2023, 38(1): 1-8. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.083.
- [3] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [4] 黄万霞, 闫滨, 姬建梅. 关于国内外灰水足迹的研究综述 [J]. *环境工程*, 2017, 35(12): 149-153. DOI: 10.13205/j.hjgc.201712030.
- [5] VALE R L, NETTO A M, TORÍBIO DE LIMA XAVIER B, et al. Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 925-932. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.282.
- [6] ALLOCCA V, MARZANO E, TRAMONTANO M, et al. Environmental impact of cattle grazing on a Karst aquifer in the southern Apennines (Italy): Quantification through the grey water footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 830-837. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.05.075.
- [7] CHINI C M, LOGAN L H, STILLWELL A S. Grey water footprints of U. S. thermoelectric power plants from 2010–2016[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 145: 103733. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103733.
- [8] GALLO CORREDOR J A, LIZETH VARGAS GONZÁLEZ G, VELASCO GRANADOS M, et al. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia [J]. *Resources Policy*, 2021, 73: 102197. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102197.
- [9] BANERJEE A, GAUTAM R, MUDLIAR S, et al. Water footprint and wastewater quality assessment of yeast single cell oil production: Gate to gate approach for industrial water sustainability[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161127. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161127.
- [10] LIU W, ANTONELLI M, LIU X, et al. Towards improvement of grey water footprint assessment: With an illustration for global maize cultivation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 1-9. DOI: 10.

- 1016/j.jclepro.2017.01.072.
- [11] 张智雄, 孙才志. 中国人均灰水生态足迹变化驱动效应测度及时空分异 [J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4596-4608. DOI: 10.5846/stxb201706221136.
- [12] 姜秋香, 陶美匀, 王子龙, 等. 足迹在“水-能源-粮食-经济”关系中的应用研究进展 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2014, 55(10): 71-84. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.10.006.
- [13] 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析 [J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 86-97. DOI: 10.5846/stxb201408251675.
- [14] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 26-34. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2018.0093.
- [15] 贺志文, 向平安. 湖南省灰水足迹变化特征及其驱动因子分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2018(10): 19-26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2018.10.005.
- [16] 孙克, 聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 29-36. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06005.
- [17] 张家欣, 黄会平, 韩宇平, 等. 水足迹视角下西北旱区种植结构协同调整 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 751-760. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0073.
- [18] 李胜楠, 王远, 罗进, 等. 福建省灰水足迹时空变化及驱动因素 [J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7952-7965. DOI: 10.5846/stxb201910292274.
- [19] 林靖雯, 翁翎燕, 戴毅豪. 中国灰水足迹时空格局演变及其脱钩关系研究 [J]. *水利科技与经济*, 2019, 25(9): 14-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2019.09.003.
- [20] 孙诗阶, 许朗, 陈杰. 农业灰水足迹与农业经济增长的脱钩关系研究: 基于长江经济带 11 省市的实证分析 [J]. *节水灌溉*, 2022(6): 17-23.
- [21] 卢先智, 车力. 灰水足迹视角下长江经济带水质与经济发展关系测度 [J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(6): 41-47. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2022.06.008.
- [22] CHENG P, SUN M. Calculation of seasonal agricultural grey water footprint in monsoon region based on river reference conditions [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109638. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109638.
- [23] 陈岩, 童国平, 王蕾. 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(6): 60-66. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.010.
- [24] 陈岩, 童国平, 王蕾. 基于 DEA-BCC 模型的农业灰水足迹效率研究 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(12): 61-65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.12.012.
- [25] 徐瑞璠, 刘文新. 黄河流域农业灰水足迹与经济增长的关系研究: 基于脱钩及回弹效应 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(11): 79-91. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20231107.
- [26] 刘俊国, 赵丹丹. “量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望 [J]. *科学通报*, 2020, 65(36): 4251-4261. DOI: 10.1360/TB-2020-0918.
- [27] 刘灿辉, 金文龙, 孙英杰, 等. 水足迹视角下的太湖流域水资源利用评价 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(8): 70-77.
- [28] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 680-688. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0071.
- [29] 王雅晴, 洗超凡, 欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价 [J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 2983-2995. DOI: 10.5846/stxb201911302593.
- [30] 李友光, 袁榆梁, 李卓成, 等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(6): 100-104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.06.018.
- [31] 朱光磊, 赵春子, 朱卫红, 等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价 [J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(9): 131-143. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2020.09.14.
- [32] 郭利丹, 井沛然. 基于生态足迹法的江苏省水资源可持续利用评价 [J]. *水利经济*, 2020, 38(3): 19-25. DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2020.03.004.
- [33] 王艳, 石荣媛, 乔长录. 基于模糊综合评价模型的天山北坡经济带水资源承载力评价 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 206-212. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20180913.001.
- [34] 张志君. 天山北坡经济带水资源安全评估 [J]. *水利规划与设计*, 2021(6): 15-19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2021.06.004.

Assessment of sustainability of water resource utilization on the northern slope of Tianshan Mountains based on grey water footprint

DONG Junqiao^{1,2,4}, LIU Xingcai^{2,3}, LI Zhanling^{1,4}

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 101408, China; 4. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources (in preparation),
China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The northern slope of Tianshan Mountains is the economic center of gravity of Xinjiang and an important urban agglomeration in Northwest China. Water consumption on the northern slopes of the Tianshan Mountains has increased over the years with the development of society and the economy. However, the contradiction between supply and demand for water resources had been exacerbated by the low precipitation and high evaporation intensity in Northwest China. The uneven spatial and temporal distribution of water resources in this region and the serious overexploitation of groundwater severely limited the development of local economy and restricted the adjustment function of ecosystem. Therefore, it is urgent to carry out the sustainable research of water resources on the northern slope of Tianshan Mountains.

Previous studies on water resources on the northern slope of Tianshan Mountains mostly adopted the index system evaluation method to evaluate the carrying capacity and safety level of water resources. In the past, there were more studies on the development and utilization of water resources, but fewer studies on the sustainable utilization of water resources, and the research time scale mostly stayed around 2015. In this study, grey water footprint method was adopted to select indicators from the two aspects of "quality" and "quantity" of water resources, comprehensively considered the impact of water quality and quantity on water resources sustainability, and extended the time scale to 2020. Therefore, based on the basic data such as GDP, total water resources, water supply, chemical oxygen demand and ammonia nitrogen emission, this study employed the grey water footprint methodology to conduct a thorough assessment of the sustainable utilization of water resources on the northern slope of Tianshan Mountains from 2006 to 2020, aiming to offer insights and guidance for the formulation of water resources planning in this region.

The results indicate that there are spatial variations in the grey water footprint among cities located on the northern slope of Tianshan Mountains. The spatial distribution pattern is 14.75 billion to 2.222 billion m^3 higher in the central region than in the east and west regions, and the temporal distribution trend is first rising and then decreasing. Among them, the region as a whole increased by 11.56% in 2016 compared with 2006, and decreased by 23.30% in 2020 compared with 2016. There are differences in the composition of grey water footprint in different cities, most cities are dominated by agricultural grey water footprint, Urumqi domestic grey water footprint also occupies a large proportion, and Shihezi industrial grey water footprint accounts for the largest proportion. The sustainable utilization status of water resources in the northern slope of Tianshan Mountains as a whole and some cities mostly improved from 2014 to 2016, and the sustainable utilization index of water resources increased steadily. However, the sustainable utilization index of water resources in Bozhou and Tacheng regions grew slowly. Consequently, the study area continues to confront significant pressures regarding water resources, necessitating enhancements in the sustainable utilization of these resources. The findings of this study can serve as a valuable reference for promoting high-quality water resources management on the northern slope of Tianshan Mountains.

Key words: water resource; water resource utilization; sustainability; grey water footprint; the northern slope of Tianshan Mountains