

# 基于“三生”功能的西藏自治区 水资源承载力系统耦合关系

刘庆芳<sup>1</sup>, 王小坤<sup>1</sup>, 朱青<sup>1,2</sup>, 宋金平<sup>1</sup>, 闫秋宇<sup>1</sup>, 赵育<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学珠海校区未来教育学院, 珠海 519087)

**摘要:** 基于PSR模型,从“三生”功能出发,实证评价西藏自治区水资源承载力,并采用耦合协调模型进一步探析水资源承载力“三生”子系统间的耦合协调关系。结果表明:(1)研究期内,西藏的水资源承载力偏低,总体呈现出波动上升的演化态势,但存在显著的空间异质性。(2)水资源“三生”子系统承载力差异显著,生产、生活和生态子系统的承载力均呈现提升态势;生产和生态子系统的承载力在空间上表现出“东高西低”的分布特征,生活子系统承载力则呈现“中部强于四周”的交替式分布规律。(3)西藏水资源承载力子系统处于较高水平耦合状态,水资源承载力子系统耦合协调度呈现出“藏东南高于藏西北,林芝市显著优于其他地市”的空间分布特征。

**关键词:** 水资源承载力;“三生”功能;PSR模型;耦合协调度;西藏自治区

随着人类经济社会发展,生产、生活和生态用水与日俱增,水资源不足已成为世界各国面临的共同问题。中国“十四五”发展规划强调,为促进人与自然和谐共生,必须提高包括水资源在内的自然资源的利用效率,推进资源总量管理和科学配置。西藏自治区(以下简称“西藏”)范围内冰川广布、河湖水系发达,水资源总量充沛;据统计,2021年西藏蕴藏水资源总量4408.74亿 $\text{m}^3$ ,域内水能资源丰富,其在中国未来水资源开发与利用中扮演着至关重要的角色。然而,从生产、生活和生态用水角度来看,西藏受资源性缺水与工程性缺水的双重影响。提高水资源承载力,促进水资源开发利用与生态环境保护相协调是实现人与自然和谐发展的基础<sup>[1]</sup>,科学评价水资源承载力对于区域高质量发展至关重要<sup>[2,3]</sup>。因此,本文系统评价西藏水资源承载力及其内部耦合协调关系,这对于促进西藏人地关系协调具有重要的理论意义和实践价值。

20世纪60年代以来,工业发展速度加快,全球水资源问题日益凸显,国外学者开始关注水资源承载力。URS公司首次分析了佛罗里达Keys流域的承载力情况,并将承载力定义为在资源(包括自然资源和人造资源)不被影响的前提下,该流域能够承载该地区的最大发展规模<sup>[4]</sup>。Joardor<sup>[5]</sup>以印度为例,以城镇供水为切入点评价城市的水资源承载力,发现水资源承载力是城市发展规划中需要重点考量的因素。Rijsberman等<sup>[6]</sup>从社会、生态、经济以及资源的不同维度对水资源系统进行研究,认为水资源承载力是城市水资源是否安全的最为重要的衡量标准之一。Kuspilić等<sup>[7]</sup>认为水资源承载力是指某特定区域

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2023-03-14

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406)

作者简介: 刘庆芳(1994-),女,安徽天长人,博士研究生,研究方向为城市与区域可持续发展。

E-mail: m13155029850@163.com

通讯作者: 朱青(1961-),女,江苏如东人,博士,副教授,研究方向为城市与区域规划。

E-mail: zhuqing@bnu.edu.cn

的水资源可以支撑最大数量居民生存发展的能力,并将不确定性和灵敏度相结合以评估克里斯岛的水资源承载力。总体来看,根据内容,国内学者对水资源承载力认知可以归纳为以下三种观点:第一种观点认为:水资源承载力是人类可开发利用水资源的最大规模<sup>[8]</sup>。第二种观点认为:水资源承载力是水资源可以支撑的最大规模人口容量<sup>[9]</sup>。第三种观点认为:水资源承载力表示的是水资源对地区经济社会可持续发展的最大支撑保障能力<sup>[10]</sup>,这一观点深受学者认同。在水资源承载力评价方法上,一部分学者采用综合评价法系统探索水资源承载力。常见的综合分析方法为主成分分析法<sup>[11]</sup>、模糊综合评判法<sup>[12]</sup>、投影寻踪法<sup>[13]</sup>以及物元可拓模型法<sup>[14]</sup>等。另一部分学者采用系统分析的方法对水资源承载力进行综合评价,如系统动力学方法<sup>[15]</sup>、多目标决策分析法<sup>[16]</sup>、水资源优化配置模型法<sup>[17]</sup>等。还有一部分学者采用经验公式法对水资源承载力进行研究与分析,主要研究模型包括常规趋势法<sup>[18]</sup>、简单定额法<sup>[19]</sup>与背景分析法<sup>[20]</sup>等。而研究对象主要聚焦经济带<sup>[21]</sup>、城市群<sup>[22]</sup>、市域<sup>[23]</sup>、县域<sup>[24]</sup>或某个具体流域<sup>[25]</sup>。

由此可见,已有研究成果逐渐从关注水资源自身的质、量与承载对象的状态、规模逐渐转移至水资源和承载对象的关系上,使水资源承载力的理论框架不断拓展、研究内容不断丰富、研究方法不断创新。但纵观已有研究,仍存在以下不足之处:第一,在研究内容上,关于水资源承载力的分析与评价仍然缺乏系统性,特别是有关水资源承载力系统内部耦合协调关系的综合探讨仍较为少见。第二,在研究方法上,目前主要以综合评价为主,在某种程度上忽略了指标权重的影响;同时,由于个人主观因素的影响,指标体系的构建尚不够客观,进而影响评价结果的准确性和科学性。第三,在研究视角上,西藏是中国西部地区水资源短缺和结构性不均的典型省份,但目前关于西藏这一特殊地域单元水资源承载力的研究仍鲜少见诸文献。

鉴于此,本文从水资源“三生”功能出发,将水资源系统进一步划分为生产、生活与生态子系统,基于PSR模型与西藏水资源开发利用的现状,选取各子系统的评价指标,并采用定性定量相结合的方法对具体指标进行筛选,系统构建西藏水资源承载力评价指标体系,对2015—2020年西藏水资源承载力进行评价并厘清其时空演化特征。与此同时,采用耦合协调度模型计算2015—2020年西藏各地市水资源承载力“三生”子系统间的耦合协调度,分析其耦合协调关系的时空变化特征,以期为西藏明晰水资源承载力现状,缓解水资源与经济发展、人民生活 and 生态保护间的矛盾,维护水资源保护利用和谐关系,保障人民生活 and 地区社会经济发展提供科学参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

西藏自治区冰川广布,河湖众多,境内河流流域面积约118.75万km<sup>2</sup>(其中外流区印度洋水系流域面积约占49.1%,内流区水系约占50.9%),共有大小湖泊1500多个,其中水域面积超过200 km<sup>2</sup>的大湖有23个;共有冰川11400多条,年融水量310亿m<sup>3</sup>,二者均居全国首位。据统计,全区水资源总量为4597.3亿m<sup>3</sup>,约占当年全国水资源总量的14.55%,虽然从总量的角度来看,西藏水资源充沛;但从生产、生活及生态对于水资源的利用角度来看,西藏仍属于水资源开发利用不协调地区。

1.2 研究方法

1.2.1 修正后熵值法

熵值法即根据各项指标数据信息效用值的大小来确定指标的权重系数，在一定程度上可减少因主观因素造成的结果偏差。为厘清水资源承载力的时序演变规律，本文在熵值法中引入时间变量，进一步提高权重测算的客观性和科学性。首先，本文采用修正后熵值法对水资源承载力各评价指标赋权；其次，采用线性加权法测算西藏市域水资源承载力指数。具体计算公式见文献 [26]。

1.2.2 耦合协调度模型

水资源承载力的变化既可能是水资源内部系统间协调稳步改善的结果，又可能是子系统间此消彼长、相互作用的结果<sup>[27]</sup>，耦合协调度模型可进一步阐释西藏水资源承载力内部系统的发展规律，多个系统产生作用的耦合度模型公式为：

$$C=\frac{3\sqrt[3]{u_1u_2u_3}}{u_1+u_1+u_1}$$
 (1)

$$T=\alpha u_1+\beta u_2+\theta u_3$$
 (2)

$$D=\sqrt{C\times T}$$
 (3)

式中： $C$ 表示耦合度； $u_1$ 、 $u_2$ 和 $u_3$ 分别表示生产功能系统、生活功能系统和生态功能系统的综合评价指数； $T$ 代表综合协调指数； $D$ 表示耦合协调度； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 分别代表生产、生活、生态子系统的待定系数，参考相关研究<sup>[28]</sup>，结合西藏的实际情况，即西藏的工农业生产用水量大于生活及生态用水量；但对于西藏而言，提高居民生活水平与维护生态和谐与其社会经济发展同等重要。因此，本文认为生产、生活、生态的水资源承载能力对于西藏具有同等重要性，取 $\alpha=\beta=\theta=1/3$ 。参考相关文献<sup>[29]</sup>，以西藏自治区水资源承载力“生产—生活—生态”子系统的实际情况为依据，结合模型实际计算结果，本文将西藏自治区水资源“三生”耦合协调度 $D$ 划分为7个等级（表1）。

表1 西藏水资源承载力“三生”子系统耦合协调发展阶段划分

Table 1 Division of the coupling coordinated development stages of the "production-living-ecological" subsystem of water resources carrying capacity in Tibet

水平分类	耦合协调等级	耦合协调度	特征
失调衰退阶段	失调	$0\leq D < 0.4$	区域水资源承载力“三生”功能间无法相互促进，出现相互制约的情况，水资源承载力“三生”子系统间处于失调状态
起步阶段	濒临失调	$0.4\leq D < 0.5$	区域水资源承载力逐渐走向兼顾各子系统综合发展的道路，三者存在相互促进的趋势
	勉强协调	$0.5\leq D < 0.6$	
稳定阶段	初级协调	$0.6\leq D < 0.7$	区域水资源承载力“三生”子系统之间存在明显的协调状态，三者相互促进，薄弱处逐渐补齐，发展成效开始凸显，水资源承载力“三生”子系统之间进入磨合阶段
	中级协调	$0.7\leq D < 0.8$	
成熟阶段	良好协调	$0.8\leq D < 0.9$	区域水资源承载力“三生”子系统之间存在良好的协调发展状况，三者相辅相成，系统进入高度协调阶段，迈向高质量发展
	优质协调	$0.9\leq D \leq 1$	

1.3 指标体系构建

PSR模型的全称是“压力（Pressure）—状态（State）—响应（Response）”模型，

其核心思路是: 在经济社会高速发展中, 人类活动会给自然资源与生态环境带来“压力”, 进而影响自然资源数量、质量以及环境质量的“状态”; 国家相关政府部门为协调状态并缓解压力, 以实现人类与自然协调可持续发展, 制定了一系列与社会经济和生态环境相关的政策法规以遏制由于压力影响而导致的状态不良变化<sup>[30,31]</sup>。水资源在区域发展中具有基础性和战略性意义<sup>[32]</sup>, 支撑社会生产、保障居民生活和维护生态安全。因此, 研究某区域的水资源承载力需要综合考量社会生产、居民生活以及生态环境等系统要素, PSR模型可较好反映生产、生活和生态系统之间的关系。

针对水资源的“生产—生活—生态”功能, 结合西藏自治区的现实特点, 借助PSR模型初步构建评价水资源承载力的“压力—状态—响应”指标体系, 其中压力层(P)指标反映自然过程与人类活动对区域水资源承载力产生的胁迫, 压力的产生与研究区的经济社会发展情况紧密相关, 能够体现人类对于区域内水资源的开发利用程度以及该地生态环境的变化特征; 状态层(S)指标是用来反映在当前社会发展情况下, 区域内水资源承载力系统的现状以及当地的社会经济和生态环境等系统的现状; 响应层(R)指标是用来反映当地政府或个人为了停止、减轻与预防不利于水资源承载人类社会发展的行为或恢复区域水资源可持续发展与利用而采取的措施<sup>[33]</sup>。

本文依据PSR模型的建模要求以及指标选取原则, 参考已有文献中<sup>[10,12,14,16,34]</sup>提出的水资源承载力评价指标体系, 结合西藏自治区的实际情况, 从水资源所具有的生产功能、生活功能与生态功能出发, 初步选取西藏自治区水资源承载力评价指标体系(表2)。其中, 水资源的生产功能是指水资源与社会生产及经济发展之间的相互关系, 水资源对区域社会生产与经济发展具有支撑作用, 同时社会生产活动也会对水资源系统产生较大的影响。水资源的生活功能指的是水资源与居民生活之间的相互关系, 区域水资源对于居民生活具有重要保障作用, 居民生活也对水资源系统产生影响。水资源的生态功能是指水资源与生态环境之间的相互作用, 良好的生态环境离不开水资源, 水资源本身是生态环境的重要组成部分, 同时生态环境也具有调节径流与涵养水源等重要功能。在此基础上进一步采用Spearman相关性分析(本文采用临界值为0.01)与定性分析相结合的方法, 对初步选定的指标体系进行分析, 对比删除部分在数据上显著相关但对于西藏水资源承载力实际影响相对较小的指标, 从而达到减轻主观性影响与简化指标体系的作用。最终保留水资源生产功能子系统10个指标、生活功能子系统8个指标、生态功能子系统12个指标。

本文采用客观赋权法中的熵值法, 同时考虑面板数据, 增加时间变量, 对熵值法进行修正, 以提高权重赋予的合理性和科学性, 所得权重符合西藏经济、社会、生态实际, 如水资源承载力的生产、生活和生态功能的权重分别为0.285、0.208和0.507, 其中生态功能的重要性完全高于生产和生活功能; 在生态功能子系统内部, 雨水管道长度(0.077)、雨污合流管道长度(0.103)和污水处理总量(0.074)等具体指标的权重较大, 这说明严守生态安全底线, 加强水资源相关的环境治理极其重要, 这契合西藏“生态优先、绿色发展”的政策要求。

#### 1.4 数据来源

本文所采用数据主要来源于2015—2017年与2019—2020年的西藏自治区水资源公报、2016—2018年和2020—2021年的《西藏统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国



表2 西藏水资源承载力评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of water resources carrying capacity in Tibet

子系统	准则层	指标层 (性质)	取值范围	指标权重	系统权重
生产	压力 (P)	农业用水量/亿 m <sup>3</sup> (-)	0.646~11.447	0.012	0.285
		工业用水量/亿 m <sup>3</sup> (-)	0.017~0.916	0.011	
		人均GDP/万元 (+)	1.872~8.009	0.028	
	状态 (S)	万元GDP用水量/m <sup>3</sup> (-)	86.086~730.117	0.006	
		供水能力/亿 m <sup>3</sup> (+)	0.684~11.429	0.040	
		农田有效灌溉率/% (+)	0~95.500	0.019	
	响应 (R)	第一产业占GDP比例/% (-)	3.253~17.836	0.023	
		第二产业占GDP比例/% (+)	23.952~53.626	0.017	
		农用水泵/台 (+)	0~504	0.074	
		农村小型水电站个数/个 (+)	0~132	0.057	
生活	压力 (P)	居民生活用水量/亿 m <sup>3</sup> (-)	0.017~0.709	0.010	0.208
		人均日生活用水量/L (-)	71.320~843.630	0.005	
		人口密度/(人/km <sup>2</sup> ) (+)	821~7154	0.023	
	状态 (S)	人均占有水资源量/万 m <sup>3</sup> (+)	0.8~140.800	0.091	
		供水普及率/% (+)	30.510~100	0.005	
		漏损水量/万 m <sup>3</sup> (-)	0~2638	0.006	
	响应 (R)	绿地面积/m <sup>2</sup> (+)	0~547	0.049	
		第三产业占GDP比例/% (+)	41.194~62.375	0.019	
生态	压力 (P)	年降水量/mm (+)	136.6~2780.72	0.054	0.507
		污水排放量/万 m <sup>3</sup> (-)	10~10353	0.005	
		化肥施用量/t (-)	0~23068	0.012	
		农用塑料薄膜使用量/t (-)	0~1055	0.011	
	状态 (S)	水资源总量/亿 m <sup>3</sup> (+)	65.22~2524.69	0.063	
		产水模数/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) (+)	3~221.500	0.062	
		污水处理率/% (+)	0~97.65	0.017	
		森林覆盖率/% (+)	0.120~47.660	0.019	
	响应 (R)	雨水管道长度/km (+)	0~165	0.077	
		雨污合流管道长度/km (+)	0~552	0.103	
		污水处理总量/万 m <sup>3</sup> (+)	0~6215	0.074	
		城镇环境用水量/万 m <sup>3</sup> (+)	0~0.227	0.008	

县城建设统计年鉴》以及西藏自治区人民政府 (<http://www.xizang.gov.cn/>) 与西藏自治区水利厅 (<http://slt.xizang.gov.cn/>) 等官方网站公布数据, 部分数据采用第二次青藏高原综合科学考察研究中的科考数据进行补充。由于《中国城市建设统计年鉴》和《中国县城建设统计年鉴》中缺失2018年的统计数据, 故而本文的样本周期不包含2018年。

2 结果分析

2.1 水资源承载力整体时空演变特征

本文采用修正后熵值法计算西藏市域水资源承载力, 参考相关研究<sup>[28]</sup>, 结合西藏自治区的社会经济及自然生态实际状况, 建立水资源承载力五等分级的评价分级标准, 即

低水平（0~0.2）、较低水平（0.2~0.4）、中等水平（0.4~0.6）、较高水平（0.6~0.8）和高水平（0.8~1）（表3）。具体分析如下：

表3 西藏各地市水资源承载力综合评价指数

Table 3 Comprehensive evaluation index of water resources carrying capacity of each city in Tibet

年份	拉萨	日喀则	昌都	林芝	山南	那曲	阿里
2015	0.429	0.281	0.231	0.459	0.280	0.147	0.165
	中等水平	较低水平	较低水平	中等水平	较低水平	低水平	低水平
2016	0.514	0.323	0.246	0.502	0.321	0.222	0.174
	中等水平	较低水平	较低水平	中等水平	较低水平	较低水平	低水平
2017	0.349	0.266	0.260	0.515	0.323	0.209	0.212
	较低水平	较低水平	较低水平	中等水平	较低水平	较低水平	较低水平
2019	0.384	0.276	0.281	0.524	0.389	0.223	0.233
	较低水平	较低水平	较低水平	中等水平	中等水平	较低水平	较低水平
2020	0.409	0.285	0.293	0.560	0.380	0.213	0.229
	中等水平	较低水平	较低水平	中等水平	较低水平	较低水平	较低水平

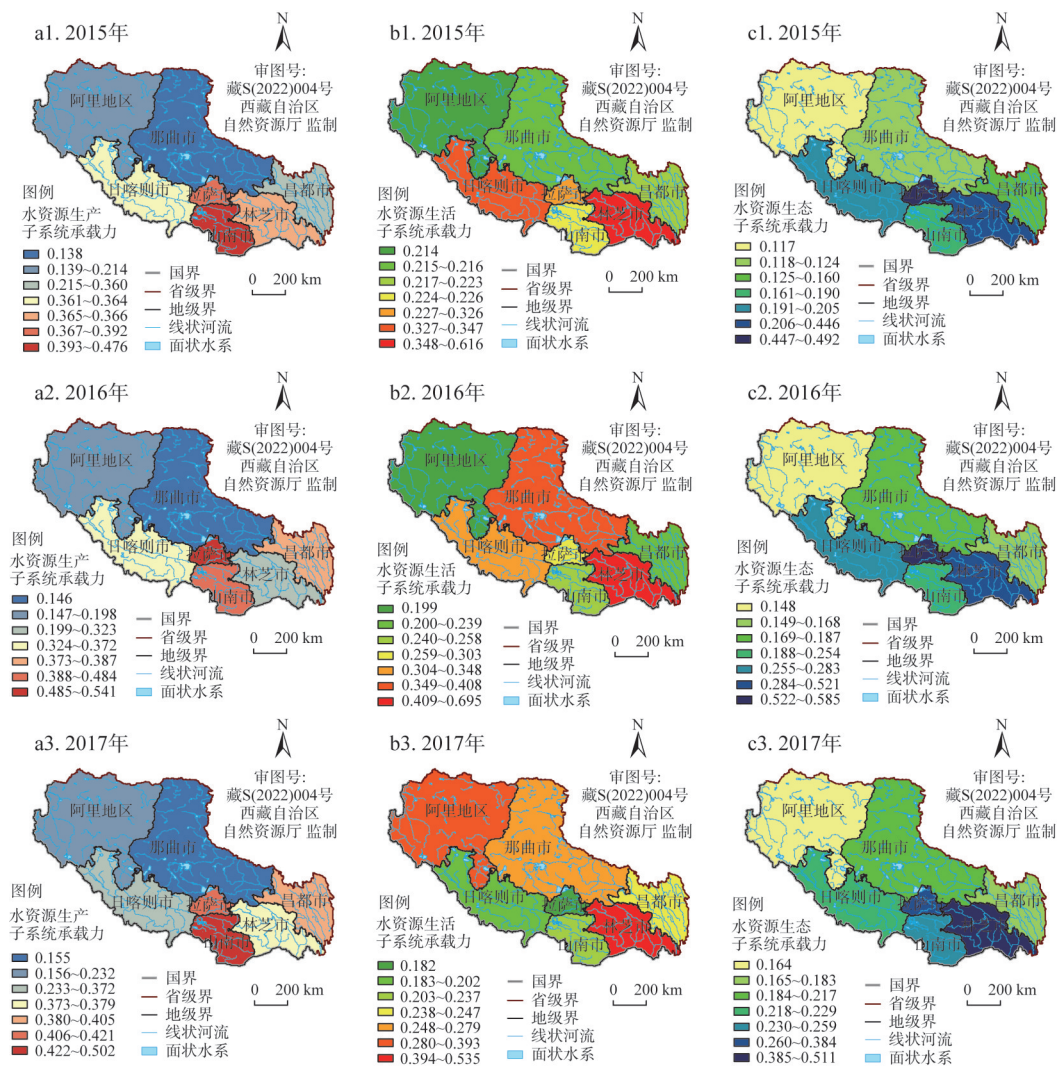
在时间趋势上，西藏水资源承载力整体呈现出波动上升的趋势，但地市间的时序变化差异较大。在水资源承载力等级上，研究期内，南部日喀则市和昌都市均始终为较低水平，山南市除2019年为中等水平外，其余年份均为较低水平；林芝市始终为中等水平，拉萨市为中等水平（2017年和2019年为较低水平）。在水资源承载力综合评价指数上，样本周期内，林芝市的水资源承载力逐年提高，表现出向更高等级提升的趋势，日喀则市的水资源承载力总体增长缓慢；那曲市、阿里地区和山南市表现出好转迹象，仅拉萨市的水资源承载力表现出波动下降的趋势。西藏自治区在面临资源性缺水与工程性缺水的双重影响下，水资源承载力总体水平不高，而“东南高，西北低”的空间分布格局与地理区位条件、人口集聚和经济格局基本一致，这表明水资源承载能力与自然地理环境和社会经济基础具有空间一致性，海拔低、地势平坦以及社会发育程度高、经济基础好的地区往往要求更高的水资源承载能力。

2.2 水资源承载力各子系统时空演变特征

时间演变特征。（1）研究期内水资源生产子系统承载力整体呈现平稳上升的趋势。其中，山南市的水资源生产子系统承载力总体为中等水平（2020年为较高水平），评价指数由0.476稳步上升至0.678；那曲市的水资源生产子系统承载力为低水平，评价指数由2015年的0.139持续上升至2020年的0.178。其余各地市的水资源生产子系统承载力均有不同程度的增长，增幅排名前三从高及低依次为“林芝市（47.32%）>山南市（42.49%）>阿里地区（39.97%）”。（2）水资源生活子系统承载力总体呈现波动上升的演化态势。研究期内，绝大部分地市水资源生活子系统的承载力在波动中提升，那曲市（39.41%）、阿里地区（30.63%）和昌都市（29.56%）的增幅排名前三。值得注意的是，日喀则市和山南市的水资源生活子系统承载力出现不同程度的下降，这可能与其面对生活用水压力，两市的响应举措缓慢相关。（3）日喀则市、昌都市、那曲市的水资源生态子系统承载力均呈现出波动、缓慢上升趋势，处于较低水平。林芝市为中等偏高水平，水资源生态子系统承载力指数由0.469上升至0.536；拉萨市水资源生态子系统承载力呈现波动下滑的态势，拉萨市作为西藏首府，国土空间开发强度相对较大，不合理的开发

行为以及脆弱的生态环境引致了水资源生态承载力的下降。

空间分布特征。(1) 水资源生产子系统承载力在空间上呈现出“东南高于西北，山南市和拉萨市优于其他”的布局规律(图1)。其中山南市水资源生产子系统的承载力表现为中等偏高水平，而北部的那曲市及阿里地区表现为低水平或较低水平。虽然拉萨市及南部的日喀则市、山南市等为工业及林牧渔畜用水大市，水资源在承载工农业生产方面面临着压力，但由于其自然条件相对优于西北，设施水平、技术水平等方面也远高于西北。(2) 水资源生活子系统承载力呈“中部强于四周”的交替式分布特征。水资源生活子系统承载力水平最高的是林芝市，整体为较高水平；四周的阿里地区、昌都市与山南市的水资源承载力生活子系统均为较低水平。西藏居民居住极为分散，东部的林芝市、拉萨市等自然及社会经济条件相对较好，因而人口密度也大于其他地市，居民居住相对集中有利于市政基础设施发挥其功效，使得供水普及率较高；同时城市绿地面积相



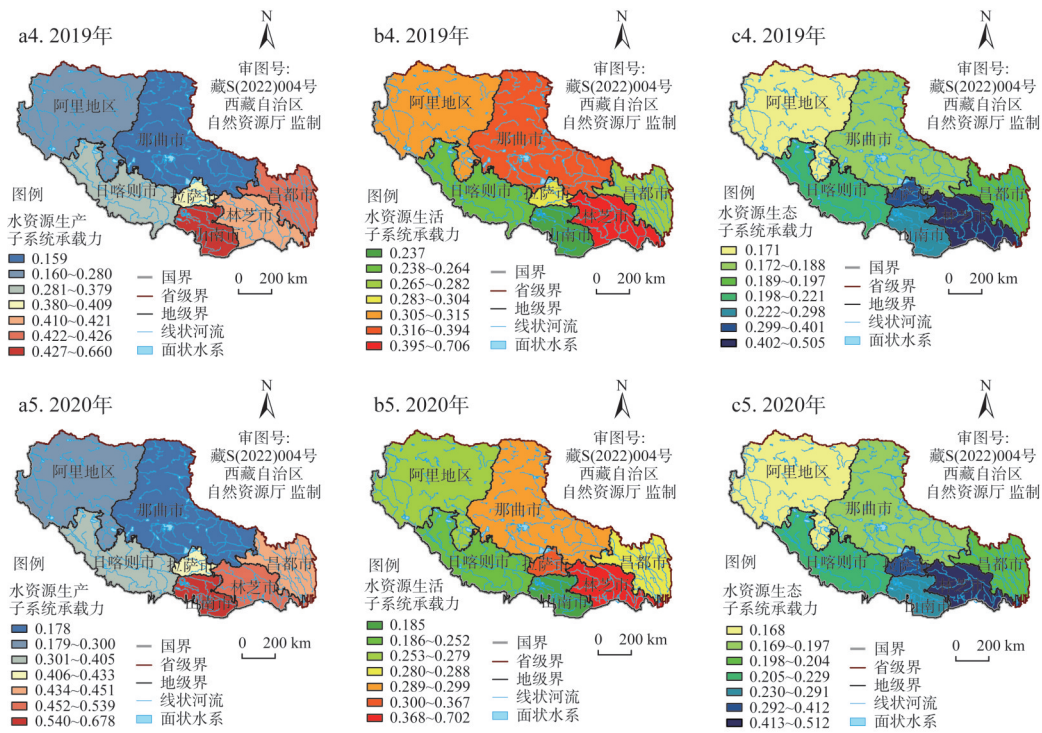
注：本图基于西藏自治区自然资源厅标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 西藏水资源生产、生活和生态子系统承载力评价

Fig. 1 Evaluation of water resources carrying capacity in production, living and ecological subsystems in Tibet



续图1



注：本图基于西藏自治区自然资源厅标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 西藏水资源生产、生活和生态子系统承载力评价

Fig. 1 Evaluation of water resources carrying capacity in production, living and ecological subsystems in Tibet

比较大，有利于涵养水源，提高地区水资源承载力。(3) 水资源生态子系统承载力表现为“东高西低，拉萨、林芝显著优于其他”的空间分布特征。拉萨市和林芝市优于其他地市的原因是：拉萨市污水处理设施相对完善，排水、排污管网布局较好；而林芝市生态环境良好，同时其排污市政基础设施水平较高，污水处理率高，水体污染程度低。

2.3 水资源承载力系统耦合协调度分析

2.3.1 水资源承载力“三生”功能耦合关系分析

近年来，西藏市域水资源承载力“三生”子系统的耦合度均落在0.863~0.998范围内(表4)，这说明自治区水资源承载力“三生”子系统的耦合程度较高，水资源承载力生产、生活与生态功能相互作用和相互影响，这也进一步证实了自治区水资源承载力“三生”子系统间存在耦合关系。水资源承载力“三生”子系统既相互独立，又相互制约和

表4 西藏水资源承载力“三生”子系统耦合度指数

Table 4 Coupling degree index of "production-living-ecological" subsystem of water resources carrying capacity in Tibet							
年份	拉萨	日喀则	昌都	林芝	山南	那曲	阿里
2015	0.986	0.969	0.946	0.977	0.920	0.971	0.963
2016	0.961	0.993	0.944	0.954	0.954	0.905	0.991
2017	0.924	0.966	0.947	0.968	0.940	0.978	0.971
2019	0.991	0.975	0.952	0.977	0.904	0.922	0.968
2020	0.998	0.968	0.949	0.990	0.863	0.974	0.969



相互影响。水资源生产空间、生活空间和生态空间复合多元，同时随着地理环境的演变而动态演替。研究期内，除日喀则市和山南市的耦合度小幅降低外，其余5个地市的耦合度均表现出微弱上升的趋势。

2.3.2 水资源承载力“三生”功能耦合协调关系分析

（1）时序演化特征。西藏市域水资源承载力“三生”子系统间的耦合协调度整体表现出波动增长的演化态势，大致经历了“上升—下降—上升”的演化阶段。如拉萨市的水资源承载力“三生”子系统的耦合协调度总体上呈现出“升—降—升”的变化趋势，昌都市和林芝市则表现出持续上升的演化趋势（表5）。从耦合协调度变化程度来看，那曲市（19.01%）、阿里地区（17.43%）和昌都市（12.84%）的水资源承载力“三生”子系统间的耦合协调度的增幅排名前三。值得注意的是，日喀则市的耦合协调度表现出小幅波动下滑的演化态势（降幅为1.6%），可能的原因为：日喀则市水资源承载力的生产和生态子系统承载力指数提高，而生活子系统承载力指数下降，进而造成子系统间的耦合协调度降低。结合前文关于水资源承载力子系统的时序特征分析可知，水资源生活子系统承载力水平的平稳上升是促进水资源承载力子系统耦合协调度上升的关键所在，水资源生活子系统承载力的大幅波动变化直接使得系统耦合协调度在2017年呈现出停滞甚至下降的状态。随着城镇化进程的加速以及人居绿化环境的改善，水资源生活子系统要素对于水资源子系统内部的约束效应也随之减弱。尤其是地区一大批水利重点工程项目落地见效，城镇供水及农村居民饮水等市政水利基础设施也不断建设与完善，大大加强了对水资源的调控与利用能力，使得“人水矛盾”得到一定缓解，水资源承载力的生产、生活、生态子系统之间良性关联的程度呈现出上升的态势。

表5 西藏水资源承载力“三生”子系统耦合协调度  
Table 5 The coupling coordination degree of the "production-living-ecological" subsystem of water resources carrying capacity in Tibet

年份	拉萨	日喀则	昌都	林芝	山南	那曲	阿里
2015	0.773	0.667	0.593	0.835	0.641	0.482	0.513
2016	0.829	0.706	0.613	0.857	0.690	0.580	0.521
2017	0.670	0.625	0.628	0.879	0.683	0.557	0.581
2019	0.744	0.649	0.657	0.894	0.736	0.585	0.609
2020	0.778	0.656	0.669	0.932	0.706	0.573	0.602

（2）空间分布特征。水资源承载力“三生”子系统的耦合协调度总体东南高于西北，林芝市与其他地市出现断层差距（图2）。藏东南地区相对海拔较低，气候适宜，植被茂密，城镇人口密度较大，经济发展条件好，相关水利设施更为健全，同时居民节水护水意识更强。因此，其水资源承载力“三生”子系统间的耦合协调程度更高。藏西北地区平均海拔高于4500 m，气候严寒，生态环境恶劣，社会生产与居民生活都极大受限，人民生活水平明显低于藏东南地区，因而其水资源承载力系统的耦合协调度相对较低。在各子系统与其系统要素间的相互作用下，耦合协调度整体表现出“林芝>拉萨>山南>日喀则>昌都>阿里>那曲”的空间分布特征。林芝市的耦合协调程度“名列前茅”，由期初的良好协调逐渐跃升为优质协调；拉萨市和山南市在研究期末演化为中级协调；那曲市和阿里地区则分别由期初的濒临失调和勉强协调升级为勉强协调和初级协调。

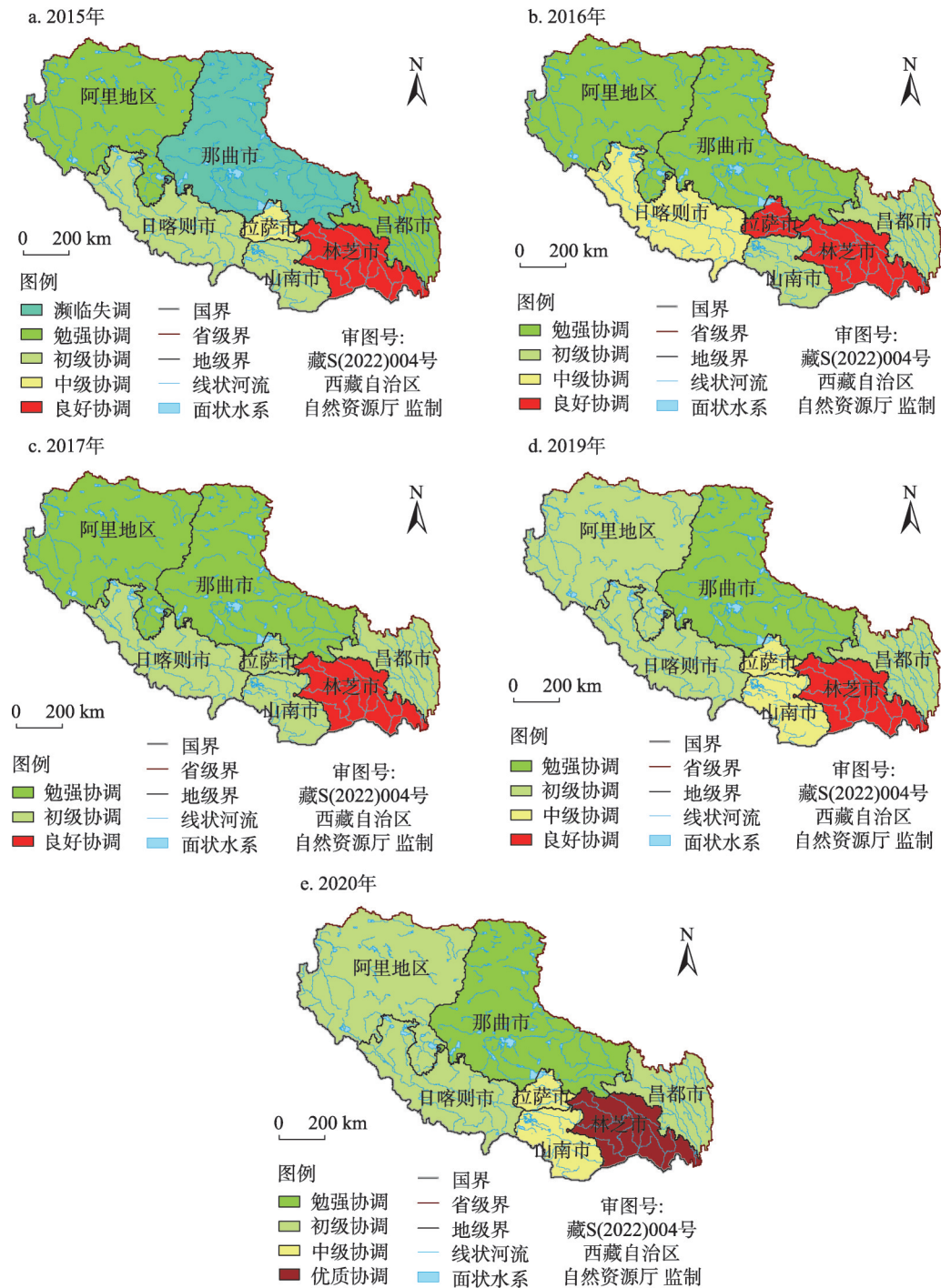


图2 2015—2020年西藏水资源承载力“三生”子系统耦合协调类型

Fig. 2 Coupling coordination types of the "production-living-ecological" subsystem of water resources carrying capacity in Tibet from 2015 to 2020

调；昌都市在2015年后始终保持初级协调的状态。总体而言，研究期末，自治区所有地市水资源承载力“三生”子系统均为协调状态，仅在协调程度上有所差异。

### 3 结论与讨论

本文通过修正后熵值法与线性加权法对西藏市域水资源承载力进行综合评价,在此基础上,采用耦合协调度模型对各地市水资源承载力“三生”子系统的耦合协调关系进行研究,主要结论如下:

(1) 研究期内,西藏水资源承载力总体呈现出波动上升的趋势,但其综合水平偏低且存在显著的空间异质性,表现出“东南高,西北低”的分布格局;林芝市和拉萨市的水资源承载力“名列前茅”。研究期内地市间水资源承载力指数的时序变化差异较大,林芝市的水资源承载力持续改善,有向更高等级跃迁的趋势。

(2) 西藏水资源生产子系统承载力持续稳定上升,在空间上呈现出“东南高于西北”的分布特征;水资源生活子系统承载力表现出波动缓慢提升的演化态势,空间上呈现出“中部强于四周”的交替式分布特点;水资源生态子系统承载力较低,经历了“上升—下降—上升”的演化阶段,在空间上呈现出“东高西低”的空间分布规律。

(3) 西藏水资源承载力子系统间处于较高水平的耦合状态,“三生”子系统间始终存在着显著的相互影响和相互作用。大部分地市的水资源承载力子系统间的耦合协调度呈增长趋势,由低水平协调向高水平协调迈进;在空间上整体呈现出“藏东南高于藏西北,林芝市与其他地市出现断层差距”的分布规律。

基于本文研究结论,为提高水资源对于西藏社会生产、居民生活和生态环境的支撑能力,促进水资源承载力“三生”子系统耦合互馈,提出如下建议:(1) 加大水利基础设施投资与建设,提高水资源调控利用能力。对水利基础设施建设落后、水资源调控利用能力较差的西藏而言,应在强化市政水利基础设施建设的同时,建立健全配套完善的农田水利工程体系,着力提高对水资源的调控利用能力。(2) 加快调整产业结构,促进产业结构优化升级。西藏应因地制宜地调整产业结构,大力发展现代化服务业,发展节水农业,优化农业内部结构,提高水资源对社会生产的支撑能力。(3) 加强科技研发,着力解决高原特殊环境用水难题。未来西藏需加大科技研发,攻克高寒环境下供水难题,提高水资源对于社会生产与居民生活的支撑能力。(4) 加强生态建设与环境保护,提高水源涵养能力。西藏的生态环境既特殊又脆弱,既是宝贵财富又是限制发展的“枷锁”。西藏在发展经济的过程中应加强生态环境保护,避免过度放牧与开垦,保障城市绿化面积与公园绿地面积,提高城市涵养水源能力,加速地区生态文明建设和高质量发展。

本文在一定程度上能为西藏自治区明晰水资源承载力现状、缓解水资源与人民生活、生态保护以及社会发展之间的矛盾提供科学参考,但仍存在如下不足之处:首先,本文以地市级行政单元为研究尺度,西藏地域面积宽广,未来若能从更小的尺度(区县级、乡镇级)展开研究,将能更加深入细致地揭示西藏水资源承载力状况,亦能进一步研究相邻区域之间的联系。其次,西藏自治区城镇和农牧区的生产生活用水与人口分布特点差异均较大,在国土空间规划与国家第二次青藏高原综合科学考察的背景下,未来相关研究可按人口密度结合功能分区对青藏高原不同功能区地域类型的水资源承载力进行更为深入的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭海丹. 水资源承载能力基础理论及实证研究. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. [GUO H D. Basic theory and em-



- pirical study of water resources carrying capacity. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.]
- [2] YANG Q, ZHANG F, JIANG Z, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 75(1): 1-8.
- [3] NIELSEN C O, ODUM E P, ODUM H T. Fundamentals of ecology. *Ecology*, 1960, 41(2): 400, Doi: 10.2307/1930249.
- [4] COUMCIL N. A Review of the Florida Keys Carrying Capacity Study. Washington. D.C: National Academic Press, 2002.
- [5] JOARDAR D S. Carrying capacities and standards as bases towards urban infrastructure planning in India. *Habitat International*, 1998, 22(3): 327-337.
- [6] RIJSBERMAN M A, VAN D V F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(3): 333-345.
- [7] KUSPILIĆ M, VUKOVIĆ Ž, HALKIJEVIĆ, et al. Assessment of water resources carrying capacity for the Island of Cres. *Građevinar*, 2018, 70(4): 305-313.
- [8] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究: 以新疆和田河流域为例. *自然资源学报*, 1993, 8(3): 229-237. [XU Y P. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in arid area: A case study of Hetian River Basin in Xinjiang. *Journal of Natural Resources*, 1993, 8(3): 229-237.]
- [9] 阮本青, 沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 58-62, 86. [RUAN B Q, SHEN J. Calculating model for moderately bearing capacity of regional water resources. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3): 58-62, 86.]
- [10] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269. [XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269.]
- [11] 李燕, 张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 172-178. [LI Y, ZHANG X Q. Assessment on carrying capacity of water resources in Yangtze River Economic Zone based on principal component analysis. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 172-178.]
- [12] 张琦, 李松森, 夏慧琳. 基于模糊综合评判模型的东北三省水资源承载力研究. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 179-188, 193. [ZHANG Q, LI S S, XIA H L. A study on water resource carrying capacity of three provinces in Northeast China based on fuzzy comprehensive evaluation model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 179-188, 193.]
- [13] 潘思成, 崔东文. 新型萤火虫算法—投影寻踪模型在区域人水和谐评价中的应用. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 124-130. [PAN S C, CUI D W. New firefly algorithm-projection pursuit model in regional human-water harmony evaluation. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(1): 124-130.]
- [14] 高玉琴, 李媛媛, 高见, 等. 虚拟水影响下区域水资源承载力评价. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5): 22-27, 77. [GAO Y Q, LI Y Y, GAO J, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under influence of virtual water. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5): 22-27, 77.]
- [15] 李玲, 潘雪倩, 夏威夷, 等. 基于SD模型的重庆市水资源承载力模拟分析. *中国农村水利水电*, 2018, (5): 128-133. [LI L, PAN X Q, XIA W Y, et al. Simulation and analysis of water resources carrying capacity in Chongqing based on SD model. *China Rural Water and Hydropower*, 2018, (5): 128-133.]
- [16] 郑奕, 魏文寿, 崔彩霞. 新疆焉耆盆地水资源承载力研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(11): 60-65. [ZHENG Y, WEI W S, CUI C X. Water resource carrying capacity in Yanqi Basin based on multi-objective analysis. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(11): 60-65.]
- [17] 张妍, 郭萍, 张帆, 等. 基于评价的水资源优化模型适用性比较. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(2): 154-159. [ZHANG Y, GUO P, ZHANG F, et al. Applicability comparison of water resources optimization model based on effect evaluation. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37(2): 154-159.]
- [18] 贾建辉, 龙晓君. 水资源承载力预测模型研究. *水利水电技术*, 2018, 49(10): 21-27. [JIA J H, LONG X J. Study on prediction model of water resources carrying capacity. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(10): 21-27.]
- [19] 王煜, 杨立彬, 张新海, 等. 西北地区水资源可利用量及承载能力分析. *人民黄河*, 2002, 24(6): 10-12. [WANG Y, YANG L B, ZHANG X H, et al. Analysis of water resources availability and carrying capacity in Northwest China. *Yel-*

- low River, 2002, 24(6): 10-12.]
- [20] 梁春玲. 区域水资源承载力评价方法研究. 河南科技, 2011, (16): 7-8. [LIANG C L. Study on evaluation method of regional water resources carrying capacity. Henan Science and Technology, 2011, (16): 7-8.]
- [21] 张荣天, 张小林, 尹鹏. 长江经济带市域土地资源承载力时空分异与影响因素探析. 经济地理, 2022, 42(5): 185-192. [ZHANG R T, ZHANG X L, YIN P. Spatial-temporal differentiation and driving factors identification of urban land resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt. Economic Geography, 2022, 42(5): 185-192.]
- [22] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 京津冀水资源承载力风险评估模型构建研究. 地理研究, 2021, 40(9): 2623-2637. [YU H Z, LI L J, LI J Y. Construction of risk assessment model of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region. Geographical Research, 2021, 40(9): 2623-2637.]
- [23] 岳启蒙, 文倩, 贺奕, 等. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响: 以武汉市为例. 生态学报, 2021, 41(14): 5586-5597. [YUE Q M, WEN Q, HE Y, et al. Influence of water ecological civilization city construction on urban water ecological carrying capacity: A case study of Wuhan city. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5586-5597.]
- [24] 何伟, 陈素雪, 仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1208-1219. [HE W, CHEN S X, QIU L Y. Comprehensive evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Three Gorges Ecological and Economy Corridor of Yangtze River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1208-1219.]
- [25] 张羽, 左其亭, 曹宏斌, 等. 沁蟒河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 50-57. [ZHANG Y, ZUO Q T, CAO H B, et al. Spatio-temporal variation characteristics and equilibrium analysis of water resources ecological footprint in the Qinmang River Basin. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(3): 50-57.]
- [26] 刘庆芳, 宋金平. 青藏高原县域人口与公共服务适配性与优化策略. 经济地理, 2022, 42(10): 43-51. [LIU Q F, SONG J P. Adaptation and optimizing strategy between county-level population agglomeration and public services in Qinghai-Tibet Plateau. Economic Geography, 2022, 42(10): 43-51.]
- [27] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水—能源—粮食系统耦合协调度的影响: 以京津冀城市群为研究对象. 自然资源学报, 2022, 37(3): 582-599. [WANG Y, SUN R X. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599.]
- [28] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269. [LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269.]
- [29] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究. 水土保持研究, 2016, 23(1): 193-199. [DAI M H, WANG L C, WEI X P. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 193-199.]
- [30] 刘雅玲, 罗雅谦, 张文静, 等. 基于压力—状态—响应模型的城市水资源承载力评价指标体系构建研究. 环境污染与防治, 2016, 38(5): 100-104. [LIU Y L, LUO Y Q, ZHANG W J, et al. The construction of urban water resources carrying capacity evaluation system based on PSR model. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(5): 100-104.]
- [31] 杨海峰, 翟国方. 灾害风险视角下的城市安全评估及其驱动机制分析: 以滁州市中心城区为例. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2368-2381. [YANG H F, ZHAI G F. Spatial assessment and driving mechanism of urban safety from the perspective of disaster risk: A case study of Chuzhou central city. Journal of Natural Resources, 2021, 36(9): 2368-2381.]
- [32] 王晶, 胡贵隆, 张良. 京津冀地区水资源承载力评价与预测. 中国农村水利水电, 2022, (3): 69-74. [WANG J, HU G L, ZHANG L. Evaluation and prediction of temporal and spatial changes of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. China Rural Water and Hydropower, 2022, (3): 69-74.]
- [33] 管西柯. 基于PSR模型的济南市水资源承载能力研究. 泰安: 山东农业大学, 2013. [GUAN K X. Research on the water resources carrying capacity of Jinan based on PSR model. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.]
- [34] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量—质—域—流的京津冀水资源承载力综合评价. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371. [YU H Z, LI L J, LI J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity- quality-water bodies-flow. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371.]

## Coupling relationship of water resources carrying capacity system in Tibet Autonomous Region based on "production-living-ecological" function

LIU Qing-fang<sup>1</sup>, WANG Xiao-kun<sup>1</sup>, ZHU Qing<sup>1,2</sup>, SONG Jin-ping<sup>1</sup>, YAN Qiu-yu<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Education for the Future, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai 519087, Guangdong, China)

**Abstract:** The total water resources in Tibet Autonomous Region are abundant but unevenly distributed in space and time, which makes it difficult for water resources to support the efficient and sustainable development of local production, life and ecology. Combined with the actual situation of Tibet and based on the PSR model framework, the water resources carrying capacity of the region was empirically evaluated from the perspective of the "production-living-ecological" function, and the coupling coordination relationship among the subsystems of the "production- living- ecological" function in water resources carrying capacity was further explored by adopting the coupling coordination model. The results show that: (1) From 2015 to 2020, the water resources carrying capacity in Tibet was relatively low, showing a fluctuating and rising evolutionary trend in general, which, however, presented significant spatial heterogeneity. (2) The carrying capacity of the "production-living-ecological" subsystems of water resources varied significantly, with the carrying capacity of the production, living and ecological subsystems all showing an increase. The carrying capacity of the production and ecological subsystems presented the spatial pattern of "high in the east and low in the west", while the carrying capacity of the living subsystem showed the alternating characteristics of "stronger in the middle than in the periphery". (3) The subsystems of water resources carrying capacity in Tibet was in a relatively high-level coupling state, and those of the coupling coordination degree presented the spatial pattern of "Southeast Tibet was higher than Northwest, and Nyingchi was significantly better than other cities". In view of the low comprehensive level of water resources carrying capacity in Tibet and the low coordination degree of subsystems of water resources carrying capacity in Northwest Tibet, it is suggested to relocate from other places, adjust the industrial structure, strengthen the construction of municipal water conservancy facilities and improve the system of farmland water conservancy projects, so as to improve the comprehensive level of water resources carrying capacity in the whole region and the coupling coordination degree among the "production-living-ecological" subsystems of water resources carrying capacity in Northwest Tibet.

**Keywords:** water resources carrying capacity; "production- living- ecological" function; PSR model; coupling coordination degree; Tibet Autonomous Region