

基于三维四面体模型的西藏资源环境承载力综合评价

封志明, 游 珍, 杨艳昭, 施 慧

(中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复实验室, 北京 100101)

摘要: 资源环境承载力定量评价与综合计量是资源环境承载力研究由分类走向综合的关键技术环节。本文从系统角度出发, 提出了“人居环境适宜性分区——资源承载力限制性分类——社会经济发展适应性分等——资源环境承载力警示性分级”的资源环境承载力综合评价的研究思路与技术路线, 构建了具有平衡态意义的资源环境承载力综合评价的三维四面体模型, 对区域资源环境承载力监测预警机制的建立具有清晰的政策指导意义。基于上述模型方法, 以公里网格为基础, 以分县为基本单元, 开展了西藏自治区的资源环境承载力综合评价。研究表明, 西藏3/4左右土地、4/5以上人口所在的县域资源环境综合承载力处于盈余或平衡状态, 资源环境综合承载状态良好; 人居环境以不适宜和临界适宜为主要特征, 社会经济发展水平普遍滞后, 人居环境自然适宜性和社会经济发展水平在较大程度上限制了西藏资源环境承载力的发挥及其提升。

关键词: 资源环境承载力; 综合评价; 四面体模型; 监测预警; 西藏

DOI: 10.11821/dlxb202103011

1 引言

资源环境承载力是对资源承载力、环境容量(环境承载力)、生态承载力等概念与内涵的集成表达^[1]。作为地理学、生态学、环境科学等学科的研究热点, 资源环境承载力不仅是一个探讨“最大负荷”的具有人类极限意义的科学命题^[2], 而且是一个极具实践价值的人口与资源环境协调发展的政策议题, 甚至是一个涉及人与自然关系、关乎人类命运共同体的哲学问题^[2]。早在20世纪初期, 资源环境承载力概念已具雏形, 最早可见于1902年Pfaundler的“物理观点之世界经济”和美国1906年农业部年鉴^[3-4]。20世纪末期以来, 出于对资源耗竭和环境恶化的科学关注, 资源环境承载力在区域规划、生态系统服务评估、全球环境现状与发展趋势以及可持续发展研究领域受到越来越多的重视^[5-7]。作为描述发展限制的概念, 国内学者长期致力于资源环境承载力评价方法研究, 水土资源^[8-17]、生态环境^[18-25]和海洋资源^[26-28]等主要类别的资源环境承载力成果为主体功能区划、人口发展规划、灾后重建规划和国土空间规划等发挥了重要的科技支撑作用^[29-36]。

资源环境承载力评价从分类到综合, 已由关注单一资源约束发展到人类对资源占有的综合评估。资源环境承载力综合研究兴起以来, 为统一量纲, 人们试图把不同物质折

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1006) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), No.2019QZKK1006]

作者简介: 封志明(1963-), 男, 河北平山人, 博士, 研究员, 主要从事资源开发与区域可持续发展。

E-mail: fengzm@igsrr.ac.cn

通讯作者: 游珍(1980-), 女, 湖北武汉人, 博士, 高级工程师, 主要从事人口地理与区域发展研究。

E-mail: youz@igsrr.ac.cn

算成能量、货币或其他尺度,以求横向对比与综合计量。从20世纪末——21世纪初,学者们发展了基于生态足迹的“虚拟土地”^[37-39]、基于水足迹的“虚拟水”^[40-41]和基于能值分析的“虚拟能量”^[42-45]等理论与实践相结合的资源环境承载力综合评价理论与方法,极大地推动了承载力研究的跨世纪发展。上述基于当量折算的思想开展的资源环境承载力综合评价与模型方法在实践中仍存在一些缺憾,如生态足迹法主要根据吸收CO₂排放量转化为对应土地面积的计算方法忽视了不同国家和地区地理环境的差异以及人类社会对自然资源的储存等^[46],所计算的结果多为象征性的指向指标,对可持续发展的指导意义相对有限^[47];“虚拟水”与水足迹强调通过贸易的手段节约农业需水,但如果所节约的水量无法被二、三产业吸收以产生更大的效益,所节约的水资源反而成为了一种浪费^[48];能值理论与能值分析方法计算较为繁杂、能值流程图尚未有一个较为科学而全面的绘制标准、能值计算过程中对研究对象的区域性和动态性考虑不周等^[49-51]。基于“压力—状态—响应”^[52-55]等相关理论,通过对一系列指标进行数学处理或直接加权得出一个综合指数,也是近年来资源环境承载力综合评价的一种典型研究方法,这种综合评价忽略了单要素承载力的基础意义,评价结果的综合指数为一个无量纲的表征值,导致物理意义不清晰,政策指导意义不强^[56]。也有学者将系统动力学模型^[57]、多目标函数^[58]、神经网络^[59]等方法用于资源环境承载力综合模拟评价,但都未能解决承载力的物理意义不清晰的弊端。

资源环境承载力定量评价与综合计量是资源环境承载力研究由分类走向综合、由基础走向应用的关键技术环节所在。如何在现有较为成熟的单要素承载力评价的基础之上,发展一套标准化、模式化的资源环境承载力综合评价方法,是当前资源环境承载力研究的重点任务和亟待解决的关键问题。基于此,本文以水土资源和生态环境承载力分类评价为基础,结合人居环境适宜性评价与社会经济发展适应性评价,研究提出了“人居环境适宜性分区—资源环境承载力限制性分类—社会经济发展适应性分等—资源环境承载力警示性分级”的资源环境承载力综合评价的研究思路与技术路线,构建了具有平衡态意义的资源环境承载能力综合评价的三维四面体模型;面向第二次青藏高原科学考察的现实需求,以公里格网为基础,以分县为基本单元,实证评估了西藏自治区的资源环境综合承载力,定量揭示了西藏不同地区的资源环境综合承载力及其承载状态,以期为区域资源环境承载力监测预警提供决策支持,为实现区域可持续发展提供科学依据。

2 基本思路与研究方法

2.1 理论框架与基本思路

人地关系是人类存在就有的客观关系,人地关系地域系统是一个复杂巨系统,人是该系统的主体与核心,资源、环境则是该系统存在的物质基础^[60]。根据增长极限理论,人类社会在追求经济增长的同时,必须关注资源环境承载力问题。同时,对于如此复杂的巨系统,我们需从系统的角度强调整体有机性,一方面,人是社会经济活动的主体,以其特有的文明和智慧协同大自然为自己服务,使其物质文化生活水平以正反馈为特征持续上升;另一方面,人是大自然的一员,其一切宏观性质的活动,都不能违背自然生态系统的基本规律,都受到自然条件的负反馈约束和调节^[61]。《我们共同的未来》中首次提出实现可持续发展的概念,其实质就是要促进人与自然的和谐,实现经济发展和人口、资源、环境相互协调^[62]。具体来说,由地形、气候、地被和水文等自然因子构成的人居环境,是人类联系自然、作用自然的主要场所,从根本上制约着区域人口的集聚水

平与分布格局^[63]；而水土资源和生态环境则是人类生存和发展需要的主要资源环境要素，是关乎区域发展“最大负荷”的限制性条件^[64]；与此同时，社会经济发展对区域资源环境承载力综合承载状态起着调节作用，可以通过人类发展水平、交通通达度和城市化率等指标来评价。也就是说，一方面，人口发展与空间布局既要与人居环境自然适宜性相一致，又要与资源环境承载力相适应。这不仅体现了人居环境的自然适宜性，也体现了资源环境承载力的自然限制性；另一方面，人口发展与空间布局既要与资源环境承载力相适应，也要与社会经济发展相协调，这体现了社会经济发展对资源环境限制性的进一步适应，包括强化和调整^[65]。

根据以上理论框架，本文的基本思路是基于人口与资源环境和社会经济协调发展的视角，以人居环境自然适宜性分区为前提，以资源环境承载力限制性分类为基础，以社会经济发展适应性分等为调控，最终从系统角度完成区域尺度上资源环境承载力的警示性分级，实现区域资源环境承载力系统集成与综合评价，总体研究思路如图1所示。

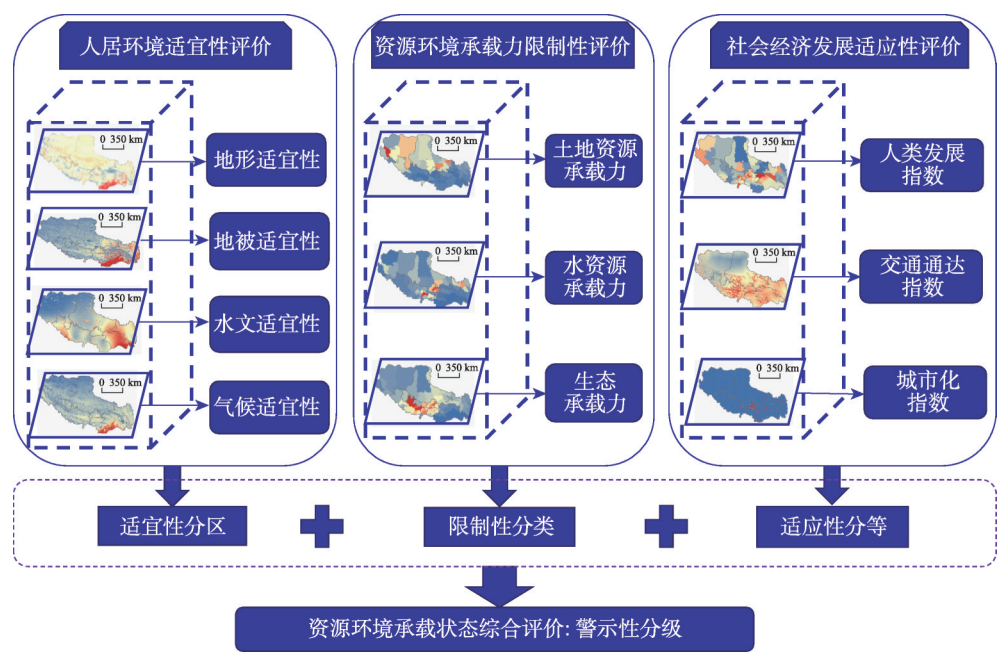


图1 资源环境承载力综合评价研究思路示意图

Fig. 1 Research thoughts for comprehensive evaluation of resource and environmental carrying capacity

2.2 研究方法与技术流程

遵循“人居环境适宜性分区——资源环境承载力限制性分类——社会经济发展适应性分等——资源环境承载力警示性分级”的资源环境承载力综合评价的研究思路和技术路线，由分类到综合，建立基于人居环境适宜指数、资源承载限制指数和社会经济发展指数的资源环境综合承载指数模型，逐步完成人居环境适宜性分区、水土资源和生态环境限制性分类、社会经济发展适应性分等和资源环境承载状态警示性分级。

第一步，建立基于地形起伏度、地被指数、水文指数和温湿指数的人居环境适宜指数（HSI）模型，以公里格网为基础，逐步完成区域人居环境适宜性评价与适宜性分区。

第二步，建立基于土地资源承载指数、水资源承载指数和生态承载指数的资源承载

限制指数 (RCI) 模型, 以分县或适宜流域为单元, 逐步完成水土资源和生态环境承载力评价和限制性分类。

第三步, 建立基于人类发展指数、交通通达指数和城市化指数的社会经济发展指数 (SDI) 模型, 以分县为研究单元逐步完成区域社会经济发展水平评价与适应性分等。

第四步, 建立基于人居环境适宜指数、资源承载限制指数和社会经济发展指数的资源环境综合承载指数 (PREDI) 模型, 从分项到综合, 逐级完成区域资源环境承载力综合评价与警示性分级。以上“3+1”框架的总体技术路线如图2所示。

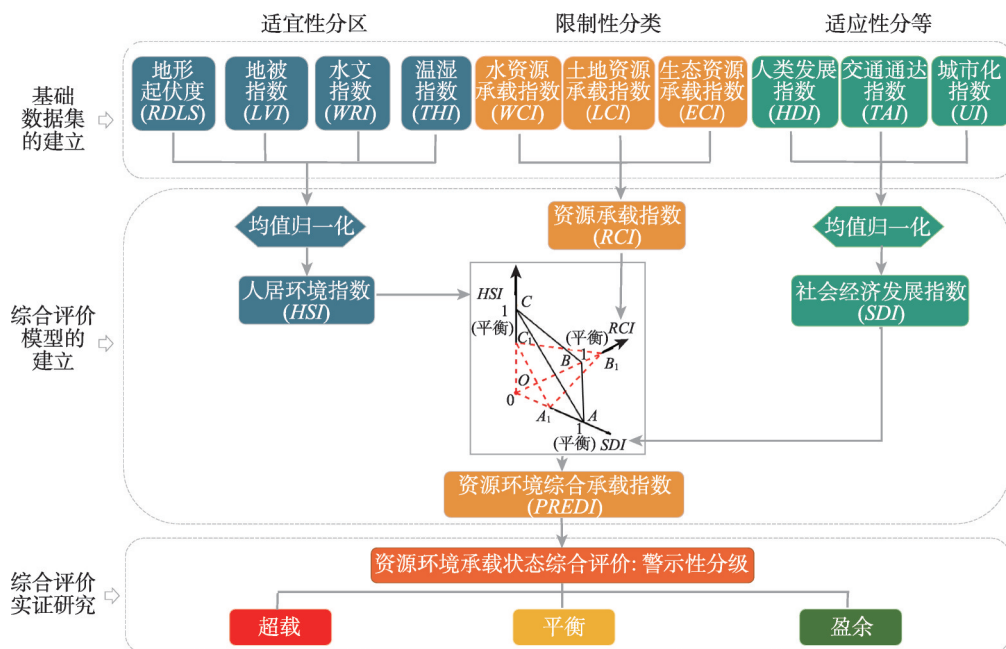


图2 西藏资源环境承载综合评价工作流程图

Fig. 2 Flow chart of comprehensive evaluation methods of resource and environmental carrying in Tibet

(1) 人居环境适宜指数模型

区域人居环境适宜性可以通过人居环境适宜指数来表达。人居环境适宜指数是归一化后的地形起伏度、地被指数、水温指数和温湿指数的数理综合 (各基础指数计算方法见表1) [63], 具体归一化方法如下:

$$x_i^* = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

$$x_i^* = \frac{\max(X) - x_i}{\max(X) - \min(X)} \quad (2)$$

式中: x_i^* 为变量 x 在区域 i 归一化后的值; x_i 为变量 x 在区域 i 的原始值; X 是变量 x 的集合。在本文中, 只有地形起伏度用式 (2) 进行归一化, 其它指数依式 (1) 进行归一化。考虑到地形因素对人居环境的决定性作用, 本文建立了以地形起伏度为高, 地被指数、水温指数和温湿指数为底的三角锥空间模型 (图3), 用来计算人居环境适宜指数。为了保留“3+1”框架下综合指数为1时的物理意义 (即平衡状态), 本文将归一化后的 HSI 进行了平移化处理, 即均值归一化, 其计算方法如下:

$$HSI = HSI_{one} - k + 1 \quad (3)$$

表1 人居环境各分项指数的计算方法列表

Tab. 1 List of calculation methods for human settlement sub-indexes

指标名称	计算公式	变量解释
地形起伏度	$RDLS = ALT/1000 + \{[Max(H) - Min(H)] \times [1 - P(A)/A]\} / 500$	RDLS为地形起伏度；ALT为以某一栅格单元为中心一定区域内的平均海拔；Max(H)和Min(H)分别为该区域内的最高与最低海拔；P(A)为区域内的平地面积；A为区域总面积。
地被指数	$LT_i = \left(\sum_i L_i \times A_i \right) / A$ $LVI = (NNDVI \times NLT_i) / 2$	LT _i 为以某一栅格单元为中心一定区域的土地利用类型指数；L _i 为该区域内的第i种土地利用类型；A _i 为该区域内第i种土地利用类型的面积；A为区域总面积；LVI为地被指数；NNDVI为该单元格标准化后的归一化植被指数；NLT _i 为归一化后的土地利用类型指数。
水文指数	$WRI = \alpha P + \beta Wa + \lambda L$	WRI为水文指数；P为归一化的降水量；Wa为归一化的水网密度；L为归一化的湖泊密度；α、β和λ分别为降水、水网与湖泊的权重。
温湿指数	$THI = 1.8t - 0.55(1 - f)(1.8t - 26)$	THI为温湿指数；t为月均温；f为月均空气相对湿度。

$$HSI_v = V_1 / V_0 \tag{4}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{3}}{12} (OA_1 \times OB_1 + OA_1 \times OC_1 + OB_1 \times OC_1) \times OD_1 \tag{5}$$

$$V_0 = \frac{\sqrt{3}}{12} (OA \times OB + OA \times OC + OB \times OC) \times OD \tag{6}$$

式中：HSI是均值归一化处理之后的人居环境适宜指数；HSI_{one}为HSI_v按式（1）归一化之后的人居环境适宜指数；k为研究区域HSI_{one}的均值^[63]；V₁为四面体A₁B₁C₁D₁的体积；V₀为四面体ABCD的体积；OA₁、OB₁、OC₁和OD₁分别为地被指数、水文指数、温湿指数和地形起伏度归一化后的实际值；OA、OB、OC和OD分别为地被指数、水文指数、温湿指数和地形起伏度归一化后的标准值，均为1。

由于基于公里网格数据的人居环境适宜性样本数据量大，本文采用均值标准差分级法，能最大化显示要素属性值与平均值之间的差异（表2）。当HSI = 1时，代表区域人居环境的平均状态，STD为研究区域HSI_{one}的标准差。

（2）资源承载限制指数模型

区域水土资源和生态环境限制性可以通过资源承载限制指数来表征。资源承载限制指数是土地资源承载指数、水资源承载指数和生态承载指数的数学综合，用来反映区域水土资源和生态环境的综合承载状态，计算方法如表3所示^[12, 17, 66]。

为了消除指数融合时区域某类资源承载状态过分盈余或缺而对区域其它类型资源承载状态的信息覆盖，本文利用了双曲正切函数（tanh）对各承载指数的倒数进行了规范化处理（图4），并保留了承载指数为1时的平衡状态的实际物理意义。此外，本文以国

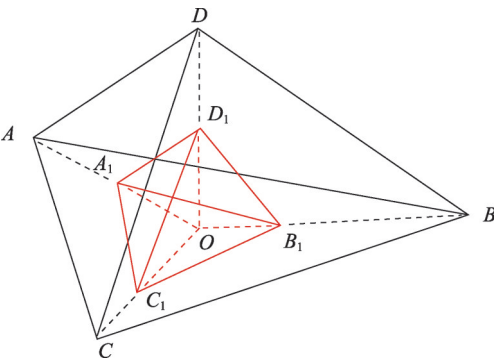


图3 人居环境适宜性指数模型

Fig. 3 Human settlement environment index model

表2 人居环境适宜性分区标准

Tab. 2 Classification criteria of human settlement environment suitability

人居环境适宜性分区	取值范围
不适宜地区	$HSI < 1 - 0.5STD$
临界适宜地区	$1 - 0.5STD \leq HSI < 1 + 0.5STD$
适宜地区	$HSI \geq 1 + 0.5STD$

表3 资源承载各分项指数的计算方法列表

Tab. 3 List of calculation methods for resources carrying sub-indexes

指标名称	计算公式	变量解释
土地资源 承载指数	$LCI=Pa/LCC$ $LCC=En/Enpc$	LCI 为土地资源承载指数; Pa 为现实人口数量; LCC 为土地资源现实承载力或土地资源承载潜力; En 为耕地资源产品转换为热量总量, $Enpc$ 人均热量摄入标准, 现实承载力以2521 kcal/人/天计。
水资源 承载指数	$WCI=Pa/WCC$ $WCC=W/Wpc$	WCI 为水资源承载指数; Pa 为现实人口数量; WCC 为水资源承载力; W 为水资源可利用量; Wpc 为人均综合用水量。
生态 承载指数	$ECI=Pa/ECC$ $ECC=SNPP/(CNPP_{ave} \times 10000)$	ECI 为生态承载指数; Pa 为现实人口数量; ECC 为生态承载力; $SNPP$ 代表生态供给总量; $CNPP_{ave}$ 代表人均生态消耗量。

际主流的城市化进程三阶段为依据^[67],在不同城市化进程阶段的区域,结合实际情况对3项承载指数赋予了不同权重(表4)。资源承载限制指数的具体计算方法如下:

$$RCI=W_L \times LCI_i+W_w \times WCI_i+W_E \times ECI_i$$

(7)

$$LCI_i=\tanh\left(\frac{1}{LCI}\right)-\tanh(1)+1$$

(8)

$$WCI_i=\tanh\left(\frac{1}{WCI}\right)-\tanh(1)+1$$

(9)

$$ECI_i=\tanh\left(\frac{1}{ECI}\right)-\tanh(1)+1$$

(10)

当 $RCI=1$ 时,代表资源承载的理论平衡状态。根据专家咨询及作者多年承载力研究的经验,将资源承载状态划分为3种限制类型(表5)。

(3) 社会经济发展指数模型

区域社会经济适应性可以通过社会经济发展指数来表征。社会经济发展指数是人类发展指数、交通通达指数和城市化指数的数学综合,各指数计算方法如表6所示^[65]。为减少各分项指标对其他指标极值的覆盖,本文建立了三维立方体模型对归一化后的 HDI 、 TAI 和 UI 进行融合(图5)和均值归一化处理,其具体计算公式如下:

$$SDI=SDI_{one}-k+1$$

(11)

$$SDI_v=V_1/V_0$$

(12)

$$V_1=OE_1 \times OF_1 \times OH_1$$

(13)

$$V_0=OE \times OF \times OH$$

(14)

式中: SDI 是进行均值归一化处理之后的社会经济发展指数; SDI_{one} 为 SDI_v 按式(1)进行归一化之后的社会经济发展指数; k 为研究区 SDI_{one} 的均值; V_1 为立方体 $OE_1F_1G_1H_1I_1J_1K_1$ 的体积; V_0 为立方体 $OEFGHIJK$ 的体积; OE_1 、 OF_1 、 OH_1 分别为 HDI 、 TAI 、 UI 归一化后的实际值; OE 、 OF 、 OH 分别为 HDI 、 TAI 、 UI 归一化后的标准值,均为1。

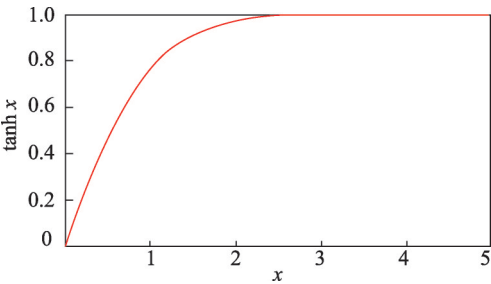


图4 双曲正切函数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hyperbolic tangent function

表4 各项承载指数权重

Tab. 4 Weights of three carrying indexes

城市化进程阶段	城镇人口占比	W_L	W_w	W_E
初期阶段	[0, 30%]	0.5	0.3	0.2
加速阶段	(30%, 70%]	1/3	1/3	1/3
后期阶段	(70%, 100%]	0.2	0.5	0.3

表5 资源环境承载力限制性分类标准

Tab. 5 Classification of the carrying capacity

资源环境承载力限制性分类	取值范围
超载	$RCI < 0.9$
平衡	$0.9 \leq RCI < 1.1$
盈余	$RCI \geq 1.1$

表6 社会经济各分项指数的计算方法列表

Tab. 6 List of calculation methods for socioeconomic development sub-indices

指标名称	计算公式	变量解释
人类发展指数	$HDI=(LEI+EI+II)/3$ $EI=2/3\times ALI+1/3\times GEI$	HDI 为人类发展指数； LEI 为预期寿命； EI 为教育指数； II 为人均GDP； ALI 为成人识字率； GEI 为小学、中学、大学综合入学率。
交通通达指数	$TAI=0.5\times(TDI+TCI)$ $TDI=\frac{r_1RDI+r_2RWDI+r_3WDI}{r_1+r_2+r_3}$ $TCI=0.53\times SDRI+0.20\times SDRWI+0.20\times SDAI+0.07\times SDPI$	TAI 为交通通达指数； TDI 为交通密度指数； TCI 为交通便捷指数； r_1 、 r_2 和 r_3 分别为道路密度指数（ RDI ）、铁路密度指数（ $RWDI$ ）和水路密度指数（ WDI ）与人口密度之间的相关系数； $SDRI$ 为中心点到道路最短距离指数； $SDRWI$ 为中心点到铁路最短距离指数； $SDAI$ 为中心点到机场最短距离指数； $SDPI$ 为中心点到港口最短距离指数。
城市化指数	$UI=0.75\times UPI+0.25\times ULI$	UI 为城市化指数； UPI 为归一化后的人口城市化率； ULI 为归一化后的土地城市化率。

当 $SDI=1$ 时，代表区域社会经济发展的平均状态， STD 为研究区域 SDI_{one} 的标准差。通过均值标准差分级法，能最大化显示要素属性值与平均值之间的差异（表7）。

（4）资源环境综合承载指数模型

遵循“适宜性分区——限制性分类——适应性分等——警示性分级”的研究思路和技术路线，建立基于三维四面体模型的资源环境综合承载指数，以定量评估区域资源环境综合承载状态。在保留综合指数为1即平衡状态的基础上，本文建立了一个三维四面体模型来计算资源环境综合承载指数（图6），其具体计算公式如下：

$$PREDI=V_1/V_0 \tag{15}$$

$$V_1=\frac{1}{6}(OX_1\times OY_1\times OZ_1) \tag{16}$$

$$V_0=\frac{1}{6}(OX\times OY\times OZ) \tag{17}$$

式中： $PREDI$ 为资源环境综合承载指数； V_1 为四面体 $OX_1Y_1Z_1$ 的体积； V_0 为四面体 $OXYZ$ 的体积； OX_1 、 OY_1 、 OZ_1 分别为 HSI 、 RCI 和 SDI 的实际值； OX 、 OY 、 OZ 则分别为 HSI 、 RCI 和 SDI 的标准平衡值，均为1。

当 $PREDI=1$ 时，代表区域资源环境承载的理论平衡状态。根据 $PREDI$ 指标，可以将区域资源环境综合承载状态划分为如下3种警示等级（表8）： $PREDI<0.9$ 时，代表资源环境承载力处于超载状态，发展空间有待拓展； $PREDI$ 介于 $0.9\sim1.1$

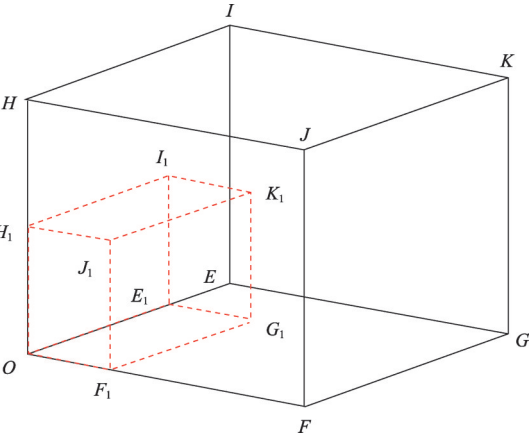


图5 社会经济发展指数模型

Fig. 5 Socioeconomic development index model

表7 社会经济发展适应性分等标准

Tab. 7 Classification criteria of socioeconomic evelopment

社会经济发展适应性分等	取值范围
社会经济发展低水平地区	$SDI<1-0.5STD$
社会经济发展中等地区	$1-0.5STD\leq SDI<1+0.5STD$
社会经济相对发达地区	$SDI\geq 1+0.5STD$

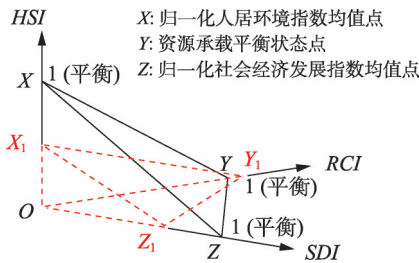


图6 资源环境综合承载指数模型(PREDI)

Fig. 6 Resource and environment development index model

时,代表资源环境承载力处于平衡状态,需要适度调整; $PREDI \geq 1.1$ 时,代表资源环境承载力处于盈余状态,尚有发展空间。

2.3 数据来源与处理

研究数据主要涉及分县尺度的人口、资源和社会经济数据,基于格网尺度的人口、环境、生态数据,以及2017年基础地理数据等,主要数据来源与技术处理过程如下:

人居环境主要数据包括气象台观测数据、数字高程模型(DEM)、归一化植被指数、土地利用数据以及河流水网数据图层。其中,温度、相对湿度和降水气象数据来源于国家气象局数据共享中心,本文分别采用克里格法、样条法以及梯度距离平方反比法对各要素进行插值,进而获取了西藏1 km×1 km网格气象要素图层;DEM来源于由USGS制备的全球GTOPO 30,其空间分辨率为30',本文经过正轴等面积双标准纬线割圆锥投影,得到1 km×1 km西藏DEM图;2000—2017年逐旬1 km×1 km归一化植被指数数据来源于中国地球科学数据共享平台;1:10万土地利用类型图、水网分布矢量图源于中国科学院地理科学与资源研究所数据中心,土地利用数据经过矢量与栅格数据的转换工具转化为1 km×1 km栅格尺度,水网分布矢量数据通过构建1 km×1 km的fishnet,运用“intersect”等空间分析工具,计算格网的水网密度后,将fishnet转化为1 km×1 km栅格尺度,由此完成了气候、地形、水文、地被4个关键因子的基础数据归一化处理。县界、乡镇界线和居民点的矢量数据是在中国地球科学数据共享平台提供的1:25万基础地理信息数据基础上,通过最新地图比对更新、修正取得。1 km×1 km栅格尺度的人口密度数据来源于美国橡树岭实验室提供的LandScan 2017。

资源承载力研究数据主要涉及分县土地面积、粮食和肉类产量、多年平均水资源量、NPP、生态消耗等数据。其中分县粮食产量、肉类产量数据源于2018年中国和分省统计年鉴;分县多年平均水资源数据源于国家人口发展战略研究集成成果;NPP来源于中国地球科学数据共享平台,生态消耗数据来源于统计年鉴中的农牧业生产数据,本文经过空间统计得到区域生态供给量(SNPP)数据,利用生物量与碳含量转换系数得到区域生态消耗量(CNPP)数据。

社会经济发展数据主要涉及基于分县尺度的出生人口预期寿命、成人识字率和小学、中学、大学综合入学率、人均GDP、城市人口的统计数据,矢量的道路、铁路、水路、港口、机场分布数据,以及土地利用数据和夜间灯光数据。其中,道路和铁路数据来源于DIVA-GIS,水路用50 m河道数据来替代,来源于Natural Earth,与上文水网密度计算方法相同,本文计算了栅格尺度下的道路密度、铁路密度和水路密度;港口数据来源于联合国粮农组织的全球地理信息系统(FAO GeoNetwork),机场数据来源于OurAirports,为获取各区域到道路、铁路、机场、港口最短距离的栅格图层,本文提取了网格几何中心,并通过“near analysis”工具计算了各网格中心点分别到4种交通工具的最短距离,最终将其转化为栅格数据;300 m×300 m土地利用数据来源于欧空局,通过计算各网格内城市用地的占比获取土地城市化的栅格图层;DMSP/OLS夜间灯光数据来源于美国国家海洋大气局,通过与城市人口统计数据相融合,获取栅格尺度下的人口城市化数据图层。

表8 资源环境综合承载力警示性分级标准
Tab. 8 Classification criteria of resource and environmental comprehensive carrying capacity

资源环境综合承载力警示性分级	取值范围
超载	$PREDI < 0.9$
平衡	$0.9 \leq PREDI < 1.1$
盈余	$PREDI \geq 1.1$

3 基于 *PREDI* 的西藏资源环境承载力综合评价 :从分类到综合

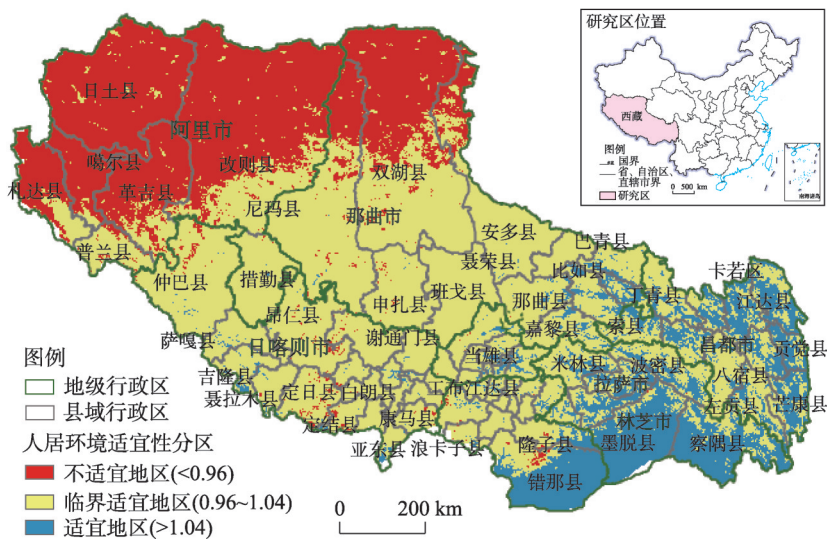
3.1 基于 *HSI* 的人居环境适宜性评价:适宜性分区

基于 *HSI* 的西藏人居环境自然适宜性评价结果表明 (图7、表9), 西藏人居环境适宜指数均值为 0.95, 人居环境适宜地区占比仅为 13.28%, 人居环境以不适宜和临界适宜为主要特征, 在较大范围内限制了西藏资源环境承载力的发挥。具体而言:

(1) 西藏人居环境不适宜地区面积占比 29.72%, 主要分布在藏西北地区; 人口占比为 1.47%, 相对集中分布在阿里地区西北部的札达县和噶尔县, 区内地广人稀疏, 人口密度仅为 0.14 人/km²; 不适宜地区土地覆被类型以草地和未利用地为主, 海拔均值高达 5081 m, 年均温度值为 -7.27 ℃, 年均湿度为 0.33, 年均降水量为 405.32 mm, 大部分区域全年基本没有气候舒适期。

(2) 西藏人居环境临界适宜地区面积占比 57.00%, 主要分布在那曲南部、日喀则市、一江两河地区以及山南和林芝北部地区; 142.67 万人长期生活和居住在此, 占比为 41.50%, 人口密度为 2.08 人/km²; 临界适宜地区土地覆被类型以草地和林地为主, 海拔均值高达 4904 m, 年均温度值为 -2.67 ℃, 年均湿度为 0.45, 年均降水量为 528.74 mm, 全年气候舒适期大部分处于为 3~5 个月之间。

(3) 西藏人居环境适宜地区面积占比仅为 13.28%, 分布在藏东南、一江两河和澜沧



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1825号的标准地图制作,底图无修改。

图7 西藏人居环境适宜性分区评价

Fig. 7 Classification of human settlement environment suitability in Tibet

表9 西藏人居环境自然适宜性分区统计

Tab. 9 Statistics of different regions for human settlement natural environment suitability in Tibet

人居环境自然适宜性分区	<i>HSI</i>	土地		人口		
		面积(万km ²)	占比(%)	数量(万人)	占比(%)	密度(人/km ²)
不适宜地区	0.94	35.73	29.72	5.07	1.47	0.14
临界适宜地区	0.99	68.52	57.00	142.67	41.50	2.08
适宜地区	1.17	15.97	13.28	196.08	57.03	12.28

江上游的河谷绿洲地带；196.08 万人长期生活和居住在此，占比为 57.03%，人口密度为 12.28 人/km²；该类地区林地和草地面积所占比重较大，城镇化率较高，基本不受水文、气候、地被条件制约，海拔相对较低，人体感觉比较舒适。

3.2 基于 RCI 的资源环境限制性评价:限制性分类

基于 RCI 的西藏资源环境限制性评价结果表明（图 8、表 10），西藏资源环境承载力限制指数（RCI）均值为 1.08，全区有 66 个县域处于盈余或平衡状态，面积占比 3/4 以上、相应人口占比 9/10，资源环境承载力以盈余为主要特征。具体而言：

（1）西藏资源环境承载力超载地区包含 8 个县域，面积占比 23.06%，只有不到一成的人居住于此，人口密度为 1.14 人/km²。该地区自然条件较为恶劣，耕地占比较低，受土地资源限制性较大。

（2）西藏资源环境承载力平衡地区包含 24 个县域，大部分分布在阿里地区西部、日喀则北部、那曲地区西部和东部，面积占比 38.63%，有 138.62 万人居住于此类地区，人口密度为 2.98 人/km²，该类地区又可以分为两类：承载力和实际人口都较低的县域，如札达县、日土县等，承载力和实际人口都比较高的县域，如城关区、桑珠孜区等。

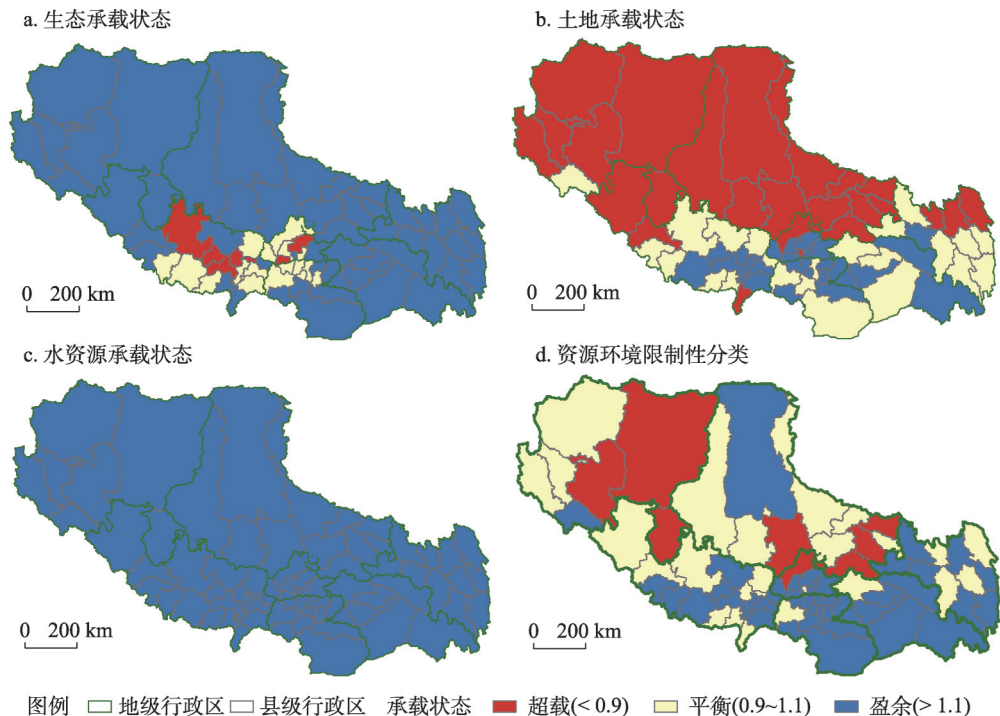


图 8 西藏资源环境限制性分类评价

Fig. 8 Restrictive classification of resource and environmental carrying capacity in Tibet

表 10 西藏资源承载状态统计

Tab. 10 Statistics of different regions for resource carrying status in Tibet

资源限制性分类	RCI	土地		人口			县域	
		面积(万 km ²)	占比(%)	数量(万人)	占比(%)	密度(人/km ²)	数量(个)	占比(%)
超载	0.87	27.73	23.06	31.66	9.21	1.14	8	10.81
平衡	1.01	46.44	38.63	138.62	40.32	2.98	24	32.43
盈余	1.16	46.06	38.31	173.55	50.48	3.77	42	56.76

(3) 西藏资源环境承载力盈余地区包含42个县域，面积占比为38.31%，主要集中在山南地区、林芝地区、双湖县等（图8），超过50%的人口分布在该类地区，人口密度为3.77人/km²。

3.3 基于SDI的社会经济适应性评价:适应性分等

基于SDI的西藏社会经济适应性评价结果表明（图9、表11），西藏自治区社会经济绝大部分地区都属于低水平发展区域（自然断点法进行分等），面积占比超过99%，相应人口占比80%，这在一定程度上限制了区域资源环境综合承载力的发挥。具体而言：

(1) 西藏社会经济低水平地区社会经济发展指数一般低于1.11，均值趋近于1；面积占比98.95%，虽然全区八成人口汇聚于该类地区，但人口密度仅为2.33人/km²。

(2) 西藏社会经济中水平地区社会经济发展指数介于1.11~1.41，均值在1.22；面积占比仅0.94%，超过一成的人口居住于此，主要分布在一江两河地带、仁布县、江孜县、乃东县、墨竹工卡县等地区，人口密度30.86人/km²，该类地区自然资源丰富，海拔较低，发展潜力较大，但较低的城镇化水平制约了该类地区的社会经济发展。

(3) 西藏社会经济中高水平发展地区社会经济发展指数（SDI）一般在1.41以上，均值为1.59；面积占比仅为0.10%，将近一成的人口居住于此，零星分布在拉萨市城关区、日喀则市桑珠孜区、工布江达镇等基础设施相对完善、城镇化率相对较高的城镇，该类区域人口密度高达250.61人/km²。

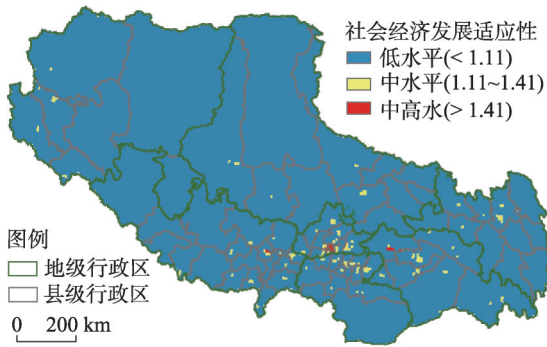


图9 西藏社会经济适应性分等评价

Fig. 9 Classification of socioeconomic development in Tibet

表 11 西藏社会经济发展水平统计

Tab. 11 Statistics of different regions at socioeconomic development levels in Tibet

社会经济适应性分等	SDI	土地		人口		
		面积(万 km ²)	占比(%)	数量(万人)	占比(%)	密度(人/km ²)
低水平发展区域	1.00	118.96	98.95	277.75	80.78	2.33
中水平发展区域	1.22	1.13	0.94	34.95	10.16	30.86
中高水平发展区域	1.59	0.12	0.10	31.12	9.05	250.61

3.4 基于PREDI的资源环境承载力综合评价:警示性分级

基于PREDI的西藏资源环境承载力综合评价表明（图10~11、表12），全域有超过3/4的县域处于盈余或平衡状态，面积占比超过70%，相应人口占比超过86%，资源环境综合承载状态整体良好；从空间分布看，东南部县、市优于西北部县、市。具体而言：

(1) 西藏资源环境承载力超载地区资源环境综合承载指数一般低于0.9，均值在0.86。全区处于超载状态的县域有9个，数量占比12.16%，面积占比28.82%，全区13.15%人口分布在该类地区，人口密度为1.60人/km²。这类地区主要分布于阿里地区、日喀则北部和那曲西部，受到人居环境适宜性、资源环境限制性和社会经济发展的高度制约，自然环境较为恶劣，资源禀赋不足，社会经济发展水平滞后，需要加强资源环境承载力监测预警机制建设。

(2) 西藏资源环境承载力平衡地区资源环境综合承载指数介于0.9~1.1之间, 均值趋近于1。全区处于平衡状态的县域有20个, 数量占比27.03%, 面积占比56.74%, 全区将近四成的人口分布在该类地区, 人口密度为2.38人/km², 该类地区主要分布于那曲地区。其中受人居环境限制的县域有11个, 受当地资源承载限制的县域有9个, 受社会经济发展水平限制的县域有14个, 类乌齐县和亚东县资源环境与社会经济发展相对均衡, 那曲县和江达县分别受到资源环境和社会经济单因素限制, 安多县和申扎县受到资源环境和社会经济的高度制约, 人口密度仅为0.84人/km²。

(3) 西藏资源环境承载力盈余地区资源环境综合承载指数一般高于1.1, 均值为1.22。全区处于盈余状态的县域有45个, 数量占比60.81%, 面积占比为14.44%, 相应人口占比为48.37%, 人口密度为11.77人/km², 该类地区主要集中于一江两河区域、藏东南及昌都大部分地区。从限制性因素来看, 受人居环境限制的县域有13个, 仅城关区受当地资源承载限制, 受社会经济发展水平限制的县域有15个, 19个县域三方面发展相对均衡, 主要集中在一江两河, 林芝北部和昌都西部。

3.5 讨论

西藏资源环境承载力综合评价实证研究, 着力通过承载指数解决承载状态评价, 为西藏不同地区的资源环境承载力监测预警提供技术支撑, 但未能综合计量承载力的数值, 对区域承载人口的“天花板”尚未确定, 研究结果只能是一种参考。

本模型中, 人居环境适宜指数和社会经济发展指数是以栅格数据为基础, 资源承载限制指数则是以分县为基本研究单元, 因此, 在综合计量时, 势必经历空间尺度转换的过程, 即由公里格网到分县单元的尺度上推, 目前本文使用的是取平均值的聚合方式来实现。但事实上, 地表空间作为一个具有很高复杂性的巨系统, 在某一尺度上观测到的现象、总结出的规律, 在另一尺度上可能有效、可能相似, 而更多需要修正。因此, 在综合过程中由于空间尺度上推导导致的误差可能会对结果产生影响。

此外, 对于藏南部分边境县域, 其常住人口数、农产品产量、社会经济现状等统计数据尚不全面, 因此除却人居环境自然适宜性评价能较为全面反映区域整体特征外, 资源环境限制性和社会经济适应性评价有待进一步完善, 综合承载力评价结果需待进行修正。

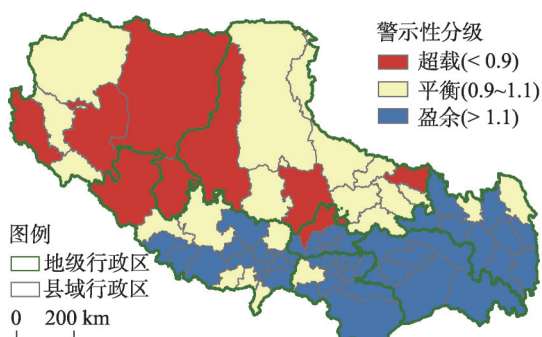


图10 西藏资源环境综合承载状态分布

Fig. 10 Distribution of resource and environmental comprehensive carrying status in Tibet

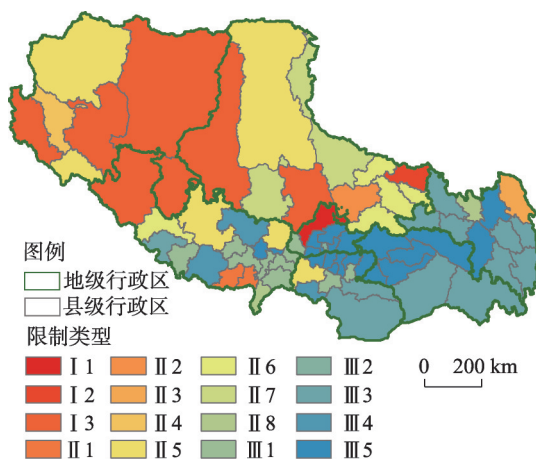


图11 西藏资源环境综合承载状态与限制类型分布

Fig. 11 Distribution of resource and environmental carrying status classification in Tibet

表 12 西藏资源环境综合承载状态与限制类型统计表
Tab. 12 Statistics of resource and environmental carrying status classification in Tibet

资源环境综合 承载状态	限制 类型	PREDI	HSI	RCI	SDI	县		土地		人口		
						数量(个)	占比(%)	面积(万km ³)	占比(%)	数量/万人	占比(%)	密度(人/km ²)
超载(I)	R限制型(I1)	0.8725	1.0018	0.8654	1.0065	1	1.35	4.82	4.01	17.86	5.19	4.55
	R&D限制型(I2)	0.8352	1.0161	0.8246	0.9969	1	1.35	4.60	3.82	18.56	5.40	4.96
	E&R&D限制型(I3)	0.8607	0.9692	0.8906	0.9973	7	9.46	25.23	20.99	8.79	2.56	0.43
	小计	0.8592	0.9781	0.8805	0.9982	9	12.16	34.65	28.82	45.21	13.15	1.60
平衡(II)	E限制型(II1)	1.0832	0.9847	1.0962	1.0035	2	2.70	2.31	1.92	5.92	1.72	3.15
	R限制型(II2)	0.9392	1.0135	0.9261	1.0006	1	1.35	7.65	6.36	41.82	12.16	6.72
	D限制型(II3)	1.0758	1.0500	1.0269	0.9977	1	1.35	6.23	5.18	29.23	8.50	5.76
	E&R限制型(II4)	0.9059	0.9440	0.9560	1.0039	1	1.35	8.54	7.10	6.50	1.89	0.93
	E&D限制型(II5)	1.0380	0.9728	1.0689	0.9980	6	8.11	19.71	16.39	11.57	3.36	0.72
	R&D限制型(II6)	0.9320	1.0182	0.9176	0.9972	5	6.76	4.93	4.10	14.04	4.08	3.50
	E&R&D限制型(II7)	0.9312	0.9820	0.9505	0.9976	2	2.70	16.36	13.61	11.16	3.25	0.84
	均衡型(II8)	1.0421	1.0229	1.0166	1.0022	2	2.70	2.50	2.08	12.07	3.51	5.94
盈余(III)	小计	0.9961	0.9957	1.0019	0.9991	20	27.03	68.21	56.74	132.29	38.48	2.38
	E限制型(III1)	1.1594	0.9914	1.1578	1.0101	10	13.51	2.01	1.67	12.48	3.63	7.64
	R限制型(III2)	1.7285	1.0288	0.9844	1.7068	1	1.35	0.25	0.21	107.28	31.20	533.23
	D限制型(III3)	1.2436	1.0778	1.1550	0.9985	12	16.22	7.25	6.03	15.33	4.46	2.60
	E&D限制型(III4)	1.1569	0.9829	1.1793	0.9980	3	4.05	5.15	4.28	14.29	4.16	3.41
	均衡型(III5)	1.2188	1.0230	1.1604	1.0268	19	25.68	2.71	2.26	16.94	4.93	7.67
	小计	1.2194	1.0280	1.1557	1.0287	45	60.81	17.36	14.44	166.32	48.37	11.77

注: E为人居环境适宜性; R为资源承载力; D为社会经济发展水平。

4 结论与展望

基于人口发展与资源环境基础和社会经济发展的互动关系,从系统出发,研究提出了“人居环境适宜性分区——资源环境承载力限制性分类——社会经济发展适应性分等——资源环境承载力警示性分级”的资源环境承载力综合评价研究思路与技术体系,构建了具有平衡态意义的资源环境承载力综合评价的三维四面体模型,实现了资源环境承载力的定量评价与综合计量。基于上述模型方法,以公里格网为基础,以分县为基本研究单元,实证开展了西藏的资源环境承载力综合评价。研究表明:

(1) 基于人居环境适宜指数(*HSI*)、资源承载限制指数(*RCI*)和社会经济发展指数(*SDI*)构建的资源环境承载力综合指数(*PREDI*)模型,即资源环境承载力综合评价的三维四面体模型蕴含了平衡态为1的物理意义,对区域资源环境承载力监测预警具有更清晰的政策指导意义和实用价值。

(2) 综合看,西藏全域接近九成的县域处于盈余或平衡状态,相应土地面积占比将近3/4,相应人口占比将近9/10,资源环境综合承载状态整体良好,且东南县、市优于西北县、市,符合自然大势。

(3) 分析看,水土资源与生态环境承载力对西藏发展尚未构成限制,人居环境自然适宜性较大范围地限制了西藏资源环境承载力水平,较低的社会经济发展水平一定程度上也降低了西藏资源环境综合承载力的提升能力。

资源环境承载力综合研究的认知未统一,限于相对较短的发展历史,统一的理论基础和方法体系尚未完全成形。本文基于人口发展与资源环境基础和社会经济水平的互动关系,研究提出了一套资源环境承载力综合评价的模型方法,与当前开展的“双评价”实践工作不同之处在于,本文依据承载力的起源及其科学涵义,以人为基本量纲,来量化资源环境承载力。但仍未解决承载阈值界定与关键参数率定等关键技术问题,在模型的综合过程中,由于数据融合的需要,尺度转换会对结果产生误差。未来研究将对承载阈值界定与关键参数率定两个技术难点做专门探讨,同时,为解决现有升尺度转换过程中存在的问题,后续将结合自上而下的演绎方法和自下而上归纳方法,探讨构建严谨、统一、自洽的升尺度转换模型,完成合理的尺度转换。通过以上问题的突破,将承载力研究实现从分类到综合、从定性到定量、从基础到应用,发展一套标准化、模式化、计算机化的评价方法与技术体系,助力完成承载力的综合计量,以期为实现科学认识区域资源环境承载力,促进区域人口与资源环境协调发展提供决策支持。

参考文献(References)

- [1] Fan Jie, Wang Yafei, Tang Qing, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V2014). *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 1-10. [樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程. *地理科学*, 2015, 35(1): 1-10.]
- [2] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: From theory to practice. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395. [封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [3] Pfandner L. The world economy in light of physics (Die Weltwirtschaft im Lichte der Physik). *Deutsche Revue*, 1902, 22 (2): 29-38, 171-182.
- [4] USDA. Yearbook of the United States Department of Agriculture 1906. Washington: Government Printing Office, 1907.
- [5] Assessment M E. Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. World Resources Institute, 2005, 42(1): 77-101.

- [6] Imhoff M L, Bounoua L, Ricketts T, et al. Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*, 2004, 429(24): 870-873.
- [7] Running S W. A measurable planetary boundary for the biosphere. *Science*, 2012, 337(6101): 1458-1459.
- [8] Ren Meie. The geographical distribution of crop productivity in Szechuan Province, China. *Acta Geographica Sinica*, 1950, 16(1): 1-22. [任美铎. 四川省农作物产量的地理分布. *地理学报*, 1950, 16(1): 1-22.]
- [9] Zhu Kezhen. Some characteristic features of Chinese climate and their effects on crop production. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(1): 1-13. [竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系. *地理学报*, 1964, 30(1): 1-13.]
- [10] Chen Baiming. The Comprehensive Productivity and Population Carrying Capacity of the Agricultural Resources in China. Beijing: China Meteorological Press, 2001. [陈百明. 中国农业资源综合生产能力与人口承载能力. 北京: 气象出版社, 2001.]
- [11] Feng Zhiming. A preliminary study on the study model of the regional land resource carrying capacity: Taking Dingxi County of Gansu Province as an example. *Journal of Natural Resources*, 1990, 5(3): 271-274. [封志明. 区域土地资源承载能力研究模式刍议: 以甘肃省定西县为例. *自然资源学报*, 1990, 5(3): 271-274.]
- [12] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000- 2010. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395-1405. [封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究. *地理研究*, 2014, 33(8): 1395-1405.]
- [13] Shi Yafeng, Qu Yaoguang. The Carrying Capacity of Water Resources and Its Reasonable Use of Urumqi River. Beijing: Science Press, 1992. [施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [14] Wang Hao, Chen Jianmin. Research of Rational Allocation and Carrying Capacity in Northwest China. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2003. [王浩, 陈建敏. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.]
- [15] Feng Zhiming, Liu Dengwei. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji Region. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 689-699. [封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 689-699.]
- [16] Xia Jun, Zhu Yijun. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269. [夏军, 朱一军. 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.]
- [17] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen. Research on the water resources restriction on population distribution in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1637-1648. [封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的水资源限制性与限制度研究. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1637-1648.]
- [18] Gao Jixi. Theoretical Exploration of Sustainable Development: Theories, Methods and Applications of Ecological Carrying Capacity. Beijing: China Environmental Science Press, 2001. [高吉喜. 可持续发展理论探索—生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.]
- [19] Xie Gaodi, Cao Shuyan, Lu Chunxia. Research on Carrying Capacity of Ecological Resources in China. Beijing: Science Press, 2011. [谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞. 中国生态资源承载力研究. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [20] Zhang Linbo. Research on the theory and method of urban ecological carrying capacity: Taking Shenzhen as an example [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007. [张林波. 城市生态承载力理论与方法研究: 以深圳为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.]
- [21] Liu Menghao, Xi Jianchao, Chen Sihong. Ecological carrying capacity accounting model and application in multi-type protected areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 1-9. [刘孟浩, 席建超, 陈思宏. 多类型保护地生态承载力核算模型及应用. *生态学报*, 2020, 40(14): 1-9.]
- [22] Xia Zenglu. Soil Environmental Capacity and Its Application. Beijing: China Meteorological Press, 1988. [夏增禄. 土壤环境容量及其应用. 北京: 气象出版社, 1988.]
- [23] Wang Shuying, Gao Chundi. Introduction to Environment. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. [王淑莹, 高春娣. 环境导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.]
- [24] Xu Dahai, Wang Yu. Plume footprints analysis for determining the bearing capacity of atmospheric environment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(6): 1734-1740. [徐大海, 王郁. 确定大气环境承载力的烟云足迹法. *环境科学学报*, 2013, 33(6): 1734-1740.]
- [25] Jiao Wenting, Chen Xingpeng, Zhang Yulong, et al. Evaluation on environment carrying capacity of Ningxia Hui Autonomous Region. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2010, 46(4): 53-57. [焦文婷, 陈兴鹏, 张予龙, 等. 宁夏回族自治区环境承载力评价. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(4): 53-57.]

- [26] Tan Yingyu, Zhang Ping, Liu Rongzi, et al. Comparative study on the carrying capacity of marine resources, ecology and environment in three bays of Bohai Sea. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(12): 7-12. [谭映宇, 张平, 刘容子, 等. 渤海内主要海湾资源和生态环境承载力比较研究. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(12): 7-12.]
- [27] Gou Lufeng, Wang Yantao, Jin Weibo. Empirical study about the carrying capacity evaluation of marine resources and environment based on the entropy-weight TOPSIS model. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 586-594. [苟露峰, 汪艳涛, 金伟博. 基于熵权 TOPSIS 模型的青岛市海洋资源环境承载力评价研究. *海洋环境科学*, 2018, 37(4): 586-594.]
- [28] Han Zenglin, Di Ganbin, Liu Kai. Research on the theories and assessment method of carrying capacity of marine region. *Areal Research and Development*, 2006, 25(1): 1-5. [韩增林, 狄乾斌, 刘锴. 海域承载力的理论与评价方法. *地域研究与开发*, 2006, 25(1): 1-5.]
- [29] Fan Jie. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 62(4): 339-350. [樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2010, 62(4): 339-350.]
- [30] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen, et al. Research on the suitability of population distribution at the county level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(6): 723-737. [封志明, 杨艳昭, 游珍, 等. 基于分县尺度的中国人口分布适宜度研究. *地理学报*, 2014, 69(6): 723-737.]
- [31] National Population Development Strategy Research Group. National Population Development Strategy Research Report. *Population Research*, 2007, 3: 4-9. [国家人口发展战略研究课题组. 国家人口发展战略研究报告. *人口研究*, 2007, 3: 4-9.]
- [32] Yang Yanzhao, Feng Zhiming. The population development functional zoning in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(10): 1-7. [杨艳昭, 封志明. 内蒙古人口发展功能分区研究. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(10): 1-7.]
- [33] Liu Yujuan, Liu Shaoquan, Liu Bintao, et al. Bearing capacity of resources and environment of Ya'an: Heavily damaged area by Wenchuan earthquake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(5): 554-559. [刘玉娟, 刘邵权, 刘斌涛, 等. 汶川地震重灾区雅安市资源环境承载力. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(5): 554-559.]
- [34] Fan Jie. Evaluation of the Carrying Capacity of Resources and Environment after the Wenchuan Earthquake. Beijing: Science Press, 2009. [樊杰. 汶川地震灾后恢复重建资源环境承载能力评价. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [35] Fan Jie. The strategy of major function oriented zoning and the optimization of territorial development patterns. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(2): 193-206. [樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 193-206.]
- [36] Liu Chaofeng, Su Jingyu, Wang Wei, et al. Catastrophe model for evaluating regional earthquake- disaster- carrying capability. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(11): 8-15. [刘朝峰, 苏经宇, 王威, 等. 区域地震灾害承载力评价的突变模型. *中国安全科学学报*, 2011, 21(11): 8-15.]
- [37] Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280-285. [徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.]
- [38] Min Qingwen, Li Yun, Cheng Shengkui, et al. Ecological footprint-based comparison of living consumption of meso-scale cities' residents in China: Taking Taizhou, Shangqiu, Tongchuan and Xilin Gol as examples. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 286-292. [闵庆文, 李云, 成升魁, 等. 中等城市居民生活消费生态系统占用的比较分析: 以泰州、商丘、铜川、锡林郭勒为例. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 286-292.]
- [39] Xie Gaodi, Cao Shuyan, Lu Chunxia, et al. Human's consumption of ecosystem services and ecological debt in China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 43-51. [谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 等. 中国的生态服务消费与生态债务研究. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 43-51.]
- [40] Gai Liqiang, Xie Gaodi, Chen Long, et al. Water eco-function zoning in China based on water footprints. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1622-1628. [盖力强, 谢高地, 陈龙, 等. 基于水足迹的中国水生态功能分区. *资源科学*, 2012, 34(9): 1622-1628.]
- [41] Li Zehong, Dong Suocheng, Li Yu, et al. Dynamic analysis on agricultural water footprint and its driving mechanism in Wuwei oasis. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 410-416. [李泽红, 董锁成, 李宇, 等. 武威绿洲农业水足迹变化及其驱动机制研究. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 410-416.]
- [42] Odum H T, Odum E C. Ecology and economy: "emergy" analysis and public policy in Texas. *The Office of Natural Resources and Texas Department of Agriculture*, 1987, 163-171.
- [43] Yan Maochao, Odum H T. A study on emergy evaluation and sustainable development of Tibet eco-economic system.

- Journal of Natural Resources, 1998, 13(2): 116-125. [严茂超, Odum H T. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究. 自然资源学报, 1998, 13(2): 116-125.]
- [44] Liu Qipu, Lin Zhenshan. Dynamic analysis and prediction on ecological footprint of Jiangsu's cropland. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 594-601. [刘钦普, 林振山. 江苏省耕地利用可持续性动态分析及预测. 自然资源学报, 2009, 24(4): 594-601.]
- [45] Zhang Xuehua, Li Jian, Zhang Hongwei. Emergy-ecological footprint integrated model for eco-city evaluation: A case of Tianjin City. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(2): 344-352. [张雪花, 李建, 张宏伟. 基于能值—生态足迹整合模型的城市生态性评价方法研究: 以天津市为例. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 344-352.]
- [46] Xu Zhongmin, Cheng Guodong, Zhang Zhiqiang. A resolution to the conception of ecological footprint. China Population, Resources and Environment, 2006, 16(6): 69-78. [徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 69-78.]
- [47] Chen Chengzhong, Lin Zhenshan. Debate and development of ecological footprint model during the last 10 years. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6252-6263. [陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展. 生态学报, 2008, 28(12): 6252-6263.]
- [48] Xu Zhongmin, Song Xiaoyu, Cheng Guodong. A new explanation of virus water strategy. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 490-495. [徐中民, 宋晓谕, 程国栋. 虚拟水战略新论. 冰川冻土, 2013, 35(2): 490-495.]
- [49] Zhang Fangyi, Pu Lijie, Zhang Jian. A modified model of ecological footprint calculation based on the theory of emergy analysis: Taking Jiangsu Province as an example. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 653-660. [张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用: 以江苏省为例. 自然资源学报, 2006, 21(4): 653-660.]
- [50] Wei Shengwen, Chen Xianjiang, Zhang Yan, et al. Discussion to the emergy evaluation analysis method. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 270-277. [魏胜文, 陈先江, 张岩, 等. 能值方法与存在问题分析. 草业学报, 2011, 20(2): 270-277.]
- [51] Xue Bing, Li Chunrong, Ren Wanxia, et al. Review of emergy theory applied in agro-ecological economic system in China. Ecological Science, 2013, 32(1): 126-132. [薛冰, 李春荣, 任婉侠, 等. 能值理论在农业生态经济的应用与展望. 生态科学, 2013, 32(1): 126-132.]
- [52] Wei C, Ye S F, Guo Z Y, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: A case in Nantong. Ocean & Coastal Management, 2014, 93: 51-59.
- [53] Zheng Defeng, Yu Zhang, Zheng Zang, et al. Empirical research on carrying capacity of human settlement system in Dalian City, Liaoning Province. Chinese Geographical Science, 2015, 25(2): 237-249.
- [54] Li Tianxiao, Fu Qiang, Peng Shengmin. Evaluation of water and soil resources carrying capacity based on DPSIR framework. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(8): 128-134. [李天霄, 付强, 彭胜民. 基于DPSIR模型的水土资源承载力评价. 东北农业大学学报, 2012, 43(8): 128-134.]
- [55] Wang Liang, Liu Hui. The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model. Acta Geographica Sinica, 2012, 43(8): 128-134. [王亮, 刘慧. 基于PS-DR-DP理论模型的区域资源环境承载力综合评价. 地理学报, 2012, 43(8): 128-134.]
- [56] Niu Fangqu, Feng Zhiming, Liu Hui. Evaluation of resources environmental carrying capacity and its application in industrial restructuring in Tibet, China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8): 1563-1575. [牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力综合评价方法在西藏产业结构调整中的应用. 地理学报, 2019, 74(8): 1563-1575.]
- [57] Niu Fangqu, Sun Dongqi. Modelling the sustainability of China's growth based on the resource and environmental carrying capacity. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2604-2613. [牛方曲, 孙东琪. 资源环境承载力与中国经济发展可持续性模拟. 地理学报, 2019, 74(12): 2604-2613.]
- [58] Wang Wenyi, Zeng Weihua. Optimizing the regional industrial structure based on the environmental carrying capacity: An inexact fuzzy multi-objective programming model. Sustainability, 2013, 5(12): 5391-5415.
- [59] Wang S, Xu L, Yang F L, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model. Science of the Total Environment, 2014, 472: 1070-1081.
- [60] Wu Chuanjun. Research core of geography: the regional system of man-land relationship. Economic Geography, 1991, 11(3): 1-4. [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. 经济地理, 1991, 11(3): 1-4.]
- [61] Ma Shijun, Wang Rusong. The social-economic-natural composite ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(1): 1-9. [马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.]
- [62] Qin Dahe, Zhang Kunmin, Niu Wenyuan, et al. The Population Resources Environment and Sustainable Development in China. Beijing: Xinhua Press, 2002. [秦大河, 张坤民, 牛文元, 等. 中国人口资源环境与可持续发展. 北京: 新华出

版社, 2002.]

- [63] You Zhen, Feng Zhiming, Yang Yanzhao, et al. Evaluation of human settlement environmental suitability in Tibet based on gridded data. *Resources Science*, 2020, 42(2): 394-406. [游珍, 封志明, 杨艳昭, 等. 栅格尺度的西藏自治区人居环境自然适宜性综合评价. *资源科学*, 2020, 42(2): 394-406.]
- [64] Feng Zhiming, Li Peng. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1475-1489. [封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1475-1489.]
- [65] You Zhen, Shi Hui, Feng Zhiming, et al. Creation and validation of a socioeconomic development index: A case study on the countries in the Belt and Road Initiative. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 120634: 1-10.
- [66] Du Wenpeng, Yan Huimin, Yang Yanzhao, et al. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(2): 115-124.
- [67] Yang Bo. Research on the three stages of the course of the urbanization. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, 16(8): 107-109. [杨波. 试论城市化进程的三个阶段. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(8): 107-109.]

Comprehensive evaluation of resource and environment carrying capacity of Tibet based on a three-dimensional tetrahedron model

FENG Zhiming, YOU Zhen, YANG Yanzhao, SHI Hui

(Resource Utilization and Environmental Remediation Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Quantitative evaluation and comprehensive measurement of resource and environmental carrying capacity are the technical keys in the research of resource and environmental carrying capacity from classification to synthesis. From a system perspective, this paper proposes a three-dimensional tetrahedron model with physical meaning to comprehensively evaluate resource and environmental carrying capacity, which is conducted on the structure of "human settlement environment suitability classification - resource and environmental carrying capacity restrictive classification - socioeconomic development adaptability classification - resource and environmental carrying capacity warning classification". Its results have clear policy guidance significance for the establishment of the dynamic-monitoring and early-warning mechanism for regional resource and environmental carrying capacity. Based on the above methods, this research, taking Tibet Autonomous Region as an example and using 1-km gridded data, quantitatively assessed regional resource and environmental carrying capacity at county level. The results show that there were about 3/4 areas in good condition of resources and environmental carrying status (surplus or balanced state), with more than 4/5 of population; the human settlement environment in Tibet was mainly characterized by unsuitability and critical suitability, while the socioeconomic development level there generally lagged behind. Within this context, we suggest that human settlement environment suitability and socioeconomic development level have greatly restricted the performance and improvement of resource and environmental carrying capacity in Tibet.

Keywords: resource and environmental carrying capacity; comprehensive evaluation; tetrahedral model; monitoring and warning; Tibet