引用格式:高洁,刘玉洁,封志明,等. 西藏自治区水土资源承载力监测预警研究[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1209–1221. [Gao J, Liu Y J, Feng Z M, et al. Research on monitoring and early warning of land and water resources carrying capacity in the Tibet Autonomous Region[J]. *Resources Science*, 2018, 40(6): 1209–1221.] DOI :10.18402/resci.2018.06.11

西藏自治区水土资源承载力监测预警研究

高 洁^{1,3}, 刘玉洁^{1,2}, 封志明^{1,4}, 潘 韬^{1,2}, 杨艳昭^{1,4}, 张 皓¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 甘肃农业大学管理学院, 兰州 610070; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要:水土资源是自然资源的重要组成部分,其对经济社会发展的承载能力是衡量人地关系协调程度和区域可持续发展水平的重要标尺。开展水土资源承载力监测预警研究,可以为有效调控区域资源环境压力提供科技支撑。本文以西藏自治区为例,首先兼顾资源、环境和生态属性,构建包括水资源、水环境、生产性用地及生态用地在内的区域水土资源承载力监测预警指标体系,然后基于国际、国家、行业标准、规定或相关研究结果,率定不同指标的关键阈值,进而从高到低依次划分出红色、橙色、黄色三个预警等级,在此基础上选取2005—2014年作为研究时段,利用层次分析法和专家打分法确定指标权重,对构建的西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系进行实证分析。研究发现:水功能区水质达标率、人均粮食产量、人均耕地面积和草地退化程度等指标的变化对区域水土资源承载力影响较为明显,需加强应对和调控措施;区域水土资源综合承载力10年间呈上升趋势,由橙色预警区间降至蓝色预警区间,西藏自治区水土资源承载状况有所好转。

关键词:水土资源承载力;监测预警;指标体系;西藏自治区

DOI :10.18402/resci.2018.06.11

1 引言

自然资源是支撑人类经济社会可持续发展的物质基础,近年来,为片面追求经济发展速度,盲目扩大城市规模,许多地区采用粗放的、以牺牲资源环境为代价换取经济增长的发展方式,给生态环境带来不利影响^[1]。如何有效限制和约束人类对自然资源的利用程度和开发规模,维护人类社会与自然资源的和谐共处,成为亟待解决的关键问题。2017年9月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》^[2]。开展区域资源环境承载力监测预警研究,有助于科学认知资源环境承载力阈值及发展基础,明晰区域未来发展趋势与发展潜力^[3]。

资源环境承载力是一定社会经济和自然资源

条件下,在保障资源环境可持续的同时,区域能够承载的最大人口或经济规模^[4]。由于区域人口和经济规模的动态变化性,单一的、静态的资源环境承载力评价已难以满足当下人们对资源承载能力的研究和认知。区域资源环境承载力的研究,正逐渐从静态走向动态,从定性趋于定量,从承载力现状评价向承载力监测预警转变^[5]。

国内针对资源环境承载力监测预警已经开展了有益探索,当前多从不同研究区域和不同指标要素构成展开。从研究区域上大多分别从陆地或海洋开展。陆地方面,袁国华等从国土资源集约节约利用的角度出发,开展了基于资源环境承载力的我国国土空间管控体系研究,并划分国土资源环境承载力监测预警指标体系^[6];徐卫华等从生态承载力

收稿日期:2017-10-15 修订日期:2018-04-04

基金项目 西藏重大科技专项(Z2016C01G01);国家重点研发计划课题(2016YFC0503504);中国科学院青年创新促进会项目(2016049)。

作者简介 高洁,女,四川成都人,硕士生,研究方向为西部地区资源环境承载力。E-mail: 623779830@qq.com

通讯作者 刘玉洁, E-mail: liuyujie@igsrr.ac.cn

评估的要求及内涵出发,提出区域生态承载力评价的方法,并以京津冀地区为例,开展区域生态资源承载力监测预警研究^[7];张静在构建环境承载力开发利用潜势评价指标体系的基础上,对北海市环境承载力开发利用潜势展开评价预警研究^[8]。海洋方面,杨正先等从海洋功能区划及环境质量标准的合规性出发,结合多年指标变化情况,划分海洋资源环境承载力阈值区间^[9];关道明等基于 DPRIS 理论构建承载力模型,建立海洋资源环境承载力指标体系和评估预警方法,并在京津冀地区展开试评估^[10]。

从指标要素构成上,有的学者开展了单要素承载力的监测预警,有的开展了多要素综合研究。单要素方面,李宁等以水资源承载力相关研究为基础,详述了水资源承载力监控预警框架设计及评估技术方法^[11];毕婉君等从中山市土地资源承载力实际情况出发,依托单项指标“短板”因素理论和指标体系法,探讨城市土地资源承载力预警机制^[12]。综合指标方面,杨渺等从区域主体功能区划出发,基于线性变换的数学方法,构建四川省资源环境承载力现状预警模型,开展资源环境承载力综合预警研究^[13]。

考虑到不同研究对象其承载体、承载力高低具有差异性,构建科学的资源环境承载力监测预警指标体系,划分承载力评价类型等级也是开展资源环境承载力监测预警研究的重点。周伟等在系统协调海洋和陆地内在联系的基础上,构建了由目标层、准则层和单项指标组成的广西资源环境承载力预警指标体系,给出阈值确定方法并提出五级预警的预警思路^[14];方创琳等在分析土地生态-生产-生活综合承载力的基础上,以县级尺度为测度对象,构建了三级土地综合承载力测度指标体系,并给出了不同层级具体指标的量化辨识方法^[15];王奎峰等构建了由4个一级类、17个二级类组成的生态环境承载力指标体系,利用层次分析法确定各指标权重,结合模糊综合评价模型完成对山东半岛6个城市的生态环境承载力评价研究^[16];郑佳怡等基于生态习题健康的环境承载力概念模型,采用层次分析法,构建区域环境承载力评价指标体系并确定各指标权重,对黄河上游流域青海片的环境承载力进行定量化计算^[17]。

西藏自治区地处青藏高原,是维护整个西南乃至全国生态安全的重要保障。中国学者从区域土

地^[18-20]、草地^[21,22]、水^[23,24]和生态承载力^[25,26]等不同方面针对西藏自治区资源环境承载力已开展较多评价,但鲜见对区域资源环境承载力动态变化及监测预警研究,更少有涉及监测预警指标体系构建。随着西藏地区人口和经济社会的不断发展,资源环境系统也在发生变化。水土资源作为资源环境系统的重要组成部分,是区域资源环境承载力监测预警研究的重点。开展水土资源承载力监测预警研究,是规范水土资源开发秩序、合理控制水土资源开发强度、构建高效协调可持续的国土空间开发格局的必要前提。本文从西藏自治区水土资源利用现状出发,构建区域水土资源承载力监测预警指标体系,并根据国际、国家和地方水土资源管理准则或行业标准及相关研究成果,划分监测预警阈值区间,将层次分析法与专家打分法相结合,选择2005—2014年作为研究时段,实证分析了区域水土资源综合承载力监测预警结果,反映区域水土资源承载状况及其变化,可以为地方政府根据资源环境承载力谋划经济社会发展提供科学支撑。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西藏位于青藏高原西南部,全区面积120.84万km²,约占全国总面积的1/8。全区辖4个地级市、3个地区,4个市辖区、72个县,2014年末全区常住人口总数为318万人,地区生产总值人民币920.83亿元。区域内河流及湖泊数量众多,水资源丰富,水资源占有量居全国第一,是众多江河的发源地。土地资源丰富,根据第二次土地调查数据显示,西藏自治区天然牧草地面积位居全国第一,约84.33万km²,占总土地面积的69.79%,是中国主要的牧区之一;耕地集中分布在藏南河谷及河谷盆地中,面积约0.44万km²,仅占总面的0.36%;未利用土地数量大,占土地总面积的30.71%。

2.2 数据来源

涉及的数据主要有统计数据、监测数据、遥感数据和草地范围数据。

统计数据来源于2005—2014年《西藏统计年鉴》^[27]、《中国统计年鉴》^[28]、《中国国土资源年鉴》^[29]和《西藏水资源公报》^[30],数据指标包括人口、地区生产总值、工业生产值、土地利用情况、农作物播种面

2018年6月

积、农作物产品产量、年末牲畜存栏数量、地区水资源总量、用水总量、工业取水总量、水功能区水质达标率等。监测数据来源于农业部2014年《全国草原监测报告》^[31],为2006—2014年西藏自治区草原产草量监测数据。遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,为MODIS中国NDVI合成产品MODNDI1M,时间分辨率为1月,时间跨度为2005—2014年,空间分辨率为1km。草地范围数据来自文献[32]。

2.3 研究方法

从西藏自治区水土资源利用现状出发,构建了由1个目标层,2个指标层,4个要素层,11个监测预警指标组成的水土资源承载力监测预警指标体系。依据国际、国家和地方水土资源管理准则或行业标准及相关研究成果,划分红、橙、黄三级监测预警指标阈值区间。在选取区域水土资源承载力监测预警指标时遵循:从区域实际出发、反映地域特征;服从总量约束、满足红线要求^[1];兼顾综合性和主导性、与目标对象密切相关;注重层次性和独立性、保证分析评价的准确性;具备实用性与可操作性、能够切实运用于监测预警工作中等要求。

选择2005—2014年作为研究时段,对西藏自治区水土资源承载力监测预警展开了实证分析研究;在区域水土资源综合监测预警研究中,将层次分析法与专家打分法相结合,邀请中国科学院地理科学与资源研究所22位专家对各项监测预警指标的重要性进行打分,根据专家打分结果,构建判断矩阵,计算其最大特征值及特征向量,得到各层次要素对上层次各要素的重要次序,建立权重向量,计算得出各指标权重。在此基础上,采用五分制打分法^[33],对评价指标进行标准化处理,公式如下:

$$P_{ij} = W_i \times S_{ij} \quad (1)$$

式中 P_{ij} 为各指标标准化值; W_i 为专家打分法计算得出的各指标权重; S_{ij} 为采用五分制打分法给出的各指标得分。

在指标标准化的基础上,计算得出西藏自治区水土资源承载力综合监测预警结果,公式如下:

$$A_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (2)$$

式中 A_i 为西藏自治区水土资源综合承载力监测预警

值; n 为监测预警指标个数。

3 结果及分析

3.1 西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系

遵循指标选取要求,构建西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系。

水资源承载力方面,从水资源和水环境两个角度出发,选用人均水资源占有量、区域用水总量、万元工业增加值耗水和万元GDP耗水构成区域水资源监测预警指标,选用水功能区水质达标率作为区域水环境监测预警指标。土地资源方面,从生产性用地和生态用地两个角度出发,选用人均粮食产量、人均耕地面积、草畜平衡指数、城市人均建设用地数量构成区域生产性用地监测预警指标,选用草地退化程度和生态用地占比构成生态用地监测预警指标,详见表1。

3.2 水土资源承载力监测预警指标阈值划分

从西藏自治区水土资源利用现状出发,划分西藏自治区水土资源承载力监测预警指标阈值区间。阈值划分的主要依据是国际、国家和地方水土资源管理相关准则或行业标准,部分采用专家学者或机构多年研究得出的经验数字,综合考虑西藏自治区的现实状况及特殊性,调整确定西藏自治区水土资源承载力监测预警指标的阈值区间(表2)。

人均水资源占有量红色预警阈值为联合国可持续发展委员会研究确定的1760m³人均水资源占有量警戒线^[36]、橙色预警阈值为2005—2014年中国人均水资源占有量、黄色预警阈值为估算得出的世界人均水资源占有量(中国人均水资源占有量约为世界人均水资源占有量的1/4)^[36]。

区域用水总量、万元工业增加值耗水和水功能区水质达标率阈值划分参考2014年7月西藏自治区出台的《实行最严格水资源管理制度考核办法》^[37]中相关考核细则(到2015年,全区万元工业增加值用水量比2010年下降30%,到2020年,西藏用水总量力争控制在36.89亿m³,重要江河湖泊水功能区水质达标率将控制在95.0%。);区域用水总量红色预警阈值为达到考核标准的最低要求,小于等于37亿m³,橙色预警阈值区间和黄色预警阈值区间划分以红色阈值区间为基础依次递减;万元工业增加值耗水红色预警阈值为达到考核标准的最低要求,小于等

表1 西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系

Table 1 Monitoring indexes system of water and land resources carrying capacity in Tibet Autonomous Region					
目标层	准则层	要素层	指标层	指标意义	数据来源/计算方法
水土资源承载力监测预警指标	水资源承载力监测预警指标	水资源承载力监测预警	人均水资源占有量	反映区域人均水资源占有量	水资源总量/区域常住人口
			区域用水总量	反映区域水资源利用量	来源于《西藏水资源公报》 ^[30]
			万元工业增加值耗水	反映区域工业用水效率	工业取水总量/工业增加值
			万元GDP耗水	反映区域水资源利用效率	区域用水总量/地区生产总值
	土地资源承载力监测预警指标	水环境承载力监测预警	水功能区水质达标率	反映区域水资源质量	来源于《西藏水资源公报》 ^[30]
			人均粮食产量	反映区域人均粮食占有量	区域粮食总产量/区域常住人口
		生产性用地监测预警	人均耕地面积	反映区域耕地压力及人均耕地面积	区域耕地面积/区域常住人口
			草畜平衡指数	反映区域草地合理载畜量与实际承载量之间的关系	(草地实际载畜量-合理载畜量)/草地合理载畜量
		生态用地监测预警	城市人均建设用地数量	反映区域人均建设用地面积	城市建设用地面积/区域常住人口
			草地退化程度	反映区域草地质量	利用NDVI计算
		生态用地占比	反映区域生态用地的面积和占有量	生态用地(林地、草地、水域)面积/区域国土总面积	

注:区域草地退化程度通过计算西藏2005—2014年草地覆盖度年变化差值得出。草地覆盖度计算公式为 $N = \frac{NDVI - NDVI_t}{NDVI_v - NDVI_t}$,式中 N 为植被覆盖度, $NDVI$ 为植被指数, $NDVI_t$ 为纯草地植被覆盖度, $NDVI_v$ 为裸地植被覆盖度^[34,35]。

表2 西藏自治区水土资源承载力监测预警指标阈值区间

Table 2 Threshold interval for monitoring and warning indexes of water and land resources carrying capacity in Tibet Autonomous Region			
指标层	黄色预警	橙色预警	红色预警
人均水资源占有量/m ³	[2 017,8 000)	[1 760,2 017)	<1 760
区域用水总量/亿m ³	[31,34)	[34,37)	≥37
万元工业增加值耗水/m ³	[290,320)	[320,350)	≥350
万元GDP耗水/m ³	[420,450)	[450,480)	≥480
水功能区水质达标率/%	[95.5,96.0)	[95.0,95.5)	≤95.0
人均粮食产量/kg	(350,400]	(300,350]	≤300
人均耕地面积/m ²	(850,1 000]	(700,850]	≤700
草畜平衡指数/%	[0,20)	[20,80)	≥80
城市人均建设用地数量/m ²	[110,130)	[130,150)	≥150
草地退化程度/%	[0,-20)	[-20,-50)	≤-50
生态用地占比/%	[60,80)	[40,60)	<40

于350m³,数值根据区域2010年实际万元工业增加值耗水计算得出,橙色预警阈值区间和黄色预警阈值区间划分以红色阈值区间为基础依次递减;水功能区水质达标率红色预警阈值为达到考核标准的最低要求,大于等于95.0%,橙色预警阈值区间和黄色预警阈值区间划分以红色阈值区间为基础依次递增;万元GDP耗水阈值划分参考西藏自治区《实行最严格水资源管理制度考核办法》^[37]中万元工业增加值耗水考核要求,红色预警阈值的取值相较区域

2010年实际万元GDP耗水量减少30%,计算得出应小于等于480m³,橙色预警阈值区间和黄色预警阈值区间划分以红色阈值区间为基础依次递减。

人均粮食产量黄色阈值划分参考400kg/(年·人)的FAO粮食安全标准^[38,39],橙色预警阈值区间和红色预警阈值区间划分以黄色阈值区间为基础依次递减。人均耕地面积阈值划分以人均粮食产量阈值区间为依据,为计算得出的能够满足区域所需粮食产出的最小人均耕地面积值^[40,41]。草畜平衡指数

2018年6月

阈值划分参考徐斌等^[42]对中国草原牧区和半牧区草畜平衡状况的监测研究及钱拴等^[43]对青藏高原地区载畜能力及草畜平衡状况研究西藏地区的研究成果,黄色阈值区间为草地载畜量超载、橙色阈值区间为严重超载、红色阈值区间为极度超载。

人均城市建设用地阈值划分参考国家《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011)^[44]中城市规划人均城市建设用地标准:城市人均建设用地指标红色阈值 $\leq 150\text{m}^2/\text{人}$,依据研究区现状人均城市建设用地指标、城市所在气候区及规划人口规模划定区域人均建设用地黄色阈值区间,橙色阈值区间取二者中间值。

草地退化程度阈值划分参考赖敏等^[45]对天然草地退化程度划分标准,根据植被覆盖度的变化情况将天然草地退化程度划分为轻度退化、中度退化和重度退化三个等级,黄色阈值区间为草地轻度退

化、橙色阈值区间为草地中度退化、红色阈值区间为草地重度退化;生态用地占比阈值根据谭永忠等^[46]研究提出的生态用地分类体系,将西藏自治区内生态用地分为基础性生态用地、保全性生态用地和和辅助性生态用地三大类,红色预警阈值划分依据为区域基础性生态用地所占比重,黄色阈值划分依据为区域基础性生态用地及保全性生态用地中林地和草地所占比重,橙色阈值取二者中间值。

3.3 水资源承载力监测预警结果及分析

为验证西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系的实用性,选用研究区2005—2014年水资源承载数据开展水资源承载力监测预警实证分析,区域10年间水资源承载力监测预警指标动态变化情况如图1所示。

区域2005—2014年水资源监测预警指标动态变化表现为:区域人均水资源占有量丰富,无预警

图1 2005—2014年西藏自治区水资源承载力监测预警指标动态变化

Figure 1 Dynamic change of early warning indexes of water resources carrying capacity monitoring in Tibet Autonomous Region from 2005 to 2014

注:水资源承载力监测指标数据来源于《西藏水资源公报》^[30],其中2005年、2006年、2007年和2011年水功能区水质达标率数据缺失。

风险,呈波动下降的变化趋势;区域用水总量呈先增加后减少的变化趋势,从2005年的黄色预警区间上升至2006年和2007年的橙色预警区间,2008年处于红色预警区间,自2009年起,区域用水总量下降明显,除2010年为橙色预警,其余年无预警风险;区域水资源利用率提升明显,万元工业增加值耗水在2005年无预警风险,在2006—2010工业用水量增加明显,处于红色预警区间,2011年下降至橙色预警区间,2012年位于黄色预警区间,2013年、2014年无预警风险;万元GDP耗水逐年递减,从2005—2011年的红色监测预警区间下降至2012年的黄色监测预警区间,到2013年、2014年无预警风险;区域2005—2014年水环境监测预警指标动态变化表现为:区域水功能区水质好转,2008年为黄色预警,2009年为橙色预警,到2010年和2012年为红色预警,自2013年起区域水功能区水质上升明显,无预警风险。

对2005—2014年西藏自治区水资源承载力指标监测预警发现,到2014年,水资源监测指标均未达到预警阈值。其中,万元工业增加值耗水和万元GDP耗水变化最为明显,在2010年时还处于红色预警区间,到2013年均已提升至无预警区间,这说明区域用水效率得到了较大提升;地区人均水资源占有量呈波动下降的变化趋势,但由于区域水资源总量较大,人均水资源占有量无预警风险;区域用水总量呈先上升后下降的变化趋势,2009年前区域用水总量经历了从黄色预警区间增至橙色预警区间并在2008年升至红色预警区间的递增过程,2009年起,除2010年为橙色预警区间,其余年无预警风险;水功能区水质达标率呈先下降后上升的变化趋势,在2008—2012年间,水功能区水质达标率从黄色预警区间下降至红色预警区间,到2012年水功能区水质达标率最低,仅为92.1%,2013年区域水功能区水质达标率上升明显,2013年后无预警风险。西藏自治区地处青藏高原,地广人稀,大量的冰川融雪能够带来丰富的淡水资源,是中国众多江河的发源地,保障区域水资源质量对江河源区及下游地区经济可持续发展有重要意义^[47]。加强对区域水功能区水质达标率的监测预警研究,坚持对区域用水总量和生产生活耗水的监测,有助于提高区域水资源综

合承载力。

3.4 土地资源承载力监测预警结果及分析

选用西藏自治区2005—2014年土地资源承载数据对土地资源承载力监测预警指标体系的实用性进行验证,西藏自治区10年间土地资源承载力监测预警指标动态变化情况如图2所示。

基于区域2005—2014年生产性用地监测预警指标动态变化表现为,耕地承载压力较大,人均粮食产量和人均耕地面积在2005—2014年一直处于橙色预警区间,10年间区域耕地承载力总体呈下降趋势;草地载畜压力减小,草畜平衡指数在2006年和2007年处于橙色预警区间,到2008—2011年处于黄色预警区间,2012年起无预警风险;区域城市人均建设用地面积增加,2008年和2014年均处于红色预警区间,且呈上升趋势;生态用地监测预警指标动态变化表现为:草地退化问题严重,退化草地占比在2005年、2006年、2009年、2012年和2014年处于红色预警区间,2007年、2008年、2010年、2011年和2013年处于橙色预警区间;区域生态用地面积增加,生态用地占比在2008年和2014年均处于黄色预警区间。

对2005—2014年西藏自治区土地资源承载力指标监测预警发现,区域土地资源承载压力较大。生产性用地方面,耕地承载压力明显,2005—2014年间人均粮食产量和人均耕地面积一直处于橙色预警区间,且不断向红色预警区间靠近,总体呈下降趋势,这与西藏自治区恶劣的自然环境密切相关,较少的宜耕土地以及高寒环境使得区域粮食产量难以满足当地人口生活需求;草地载畜压力下降,草畜平衡指数在2006年和2007年为橙色预警区间,2008—2011年降至黄色预警区间,2012年起无预警风险,说明地区放牧强度在逐步降低;城市人均建设用地面积超出国家标准,处于红色预警区间,考虑到西藏自治区地广人稀,城镇布局较为分散,且青藏铁路工程量巨大,大面积的交通用地是导致城市人均建设用地面积超标的重要原因。生态用地方面,区域草地退化问题严重,退化草地占比在2005—2006年、2009年、2012年和2014年处于红色预警区间,2007—2008年、2010—2011年和2013年处于橙色预警区间;区域生态用地面积增

2018年6月

图2 2005—2014年西藏自治区土地资源承载力监测预警指标动态变化

Figure 2 Dynamic change of early warning indexes of land resources carrying capacity monitoring in Tibet Autonomous Region from 2005 to 2014
注:区域产草量数据来源于2014年《全国草原监测报告》^[31],监测数据年为2006—2014年,2005年西藏自治区产草量数据缺失;人均建设用地和生态用地面积数据为第二次土地调查前地区土地利用数据和第二次土地调查成果数据,监测数据年为2008年和2014年。

加,从2008年的62.8%增至2014年的70.6%,但仍处于黄色预警区间。生态用地面积的增长,反映了生态修复工程的明显成效,提高了区域生态承载力,但草地退化依旧是区域重要的生态问题。需要进一步加大对西藏地区耕地数量及质量、草地载畜压力和草地退化程度的监测预警研究,保障和落实基本农田数量与质量,建立耕地保护区^[48],加大科技投入,提高单位面积耕地粮食产出;坚持“以草定畜”的合理放牧规划,坚持生态保护和草地退化治理。

3.5 水土资源承载力综合监测预警结果及分析

采取专家打分法,基于22位水资源及土地资源承载力领域专家对各监测预警指标的重要程度进行打分,在降低层次分析法主观性的同时赋予各监测预警指标权重(表3)。

可以看出,区域用水总量权重最高,为0.1828,其次为人均耕地面积和草畜平衡指数,均为0.1462,

表3 西藏自治区水土资源承载力综合监测预警指标权重

Table 3 Responsibility of early warning indexes of comprehensive monitoring of water and land resources carrying capacity in Tibet

Autonomous Region			
水资源承载力监测 预警指标	权重	土地资源承载力监测 预警指标	权重
人均水资源占有量	0.038 5	人均粮食产量	0.057 1
区域用水总量	0.182 8	人均耕地面积	0.146 2
万元工业增加值耗水	0.078 2	草畜平衡指数	0.146 2
万元GDP耗水	0.078 2	城市人均建设用地数量	0.025 5
水功能区水质达标率	0.125 0	草地退化程度	0.093 8
		生态用地占比	0.031 3

水功能区水质达标率紧随其后,为0.1250,草地退化程度、万元工业增加值耗水和万元GDP耗水的权重也较高,而城市人均建设用地数量权重最低,仅为0.0255。

采用5分制打分法^[33],对评价指标进行标准化处理。以人均粮食产量(kg/人)为例,假定当人均粮

食产量 $\geq 500\text{kg}$ 时为满意标准,则人均粮食产量大于 500kg 时为满分,即5分; $500\sim 450\text{kg}$ 之间为4分; $400\sim 450\text{kg}$ 之间为3分; $350\sim 400\text{kg}$ 之间为2分; $300\sim 350\text{kg}$ 之间为1分;小于 300kg 为0分。按照此标准对各监测预警指标进行评分和量化,西藏自治区水土资源承载力监测预警指标评分标准详见表4。在评分基础上,结合各项指标权重,对数据进行标准化处理。本文监测预警数据获取过程中,部分数据缺失:区域水功能区水质达标率在2005—2007年及2011年无监测数据,草畜平衡指数无2005年区域产草量监测数据,建设用地数量和生态用地面积仅有2008年和2014年数据。为提升区域水土资源承载力综合监测预警结果分析的完整性,选用缺失年份

前后监测结果的平均值补全缺失数据。各监测预警指标数据补全后标准化结果详见表5。

区域用水总量、万元工业增加值耗水、万元GDP耗水、水功能区水质达标率、城市人均建设用地数量和草地退化程度指标标准化后均有0值出现,其中万元GDP耗水、万元工业增加值耗水和草地退化程度0值最多,对西藏自治区水土资源承载力监测预警结果影响较大。

采用5级区间划分西藏自治区水土资源承载力综合监测预警等级,区间量度值为 $[0,5]$ 。红色预警区间为严重超载,橙色预警区间为超载,黄色预警区间为轻微超载,蓝色区间为承载均衡,绿色区间为承载良好。西藏自治区水土资源承载力综合监

表4 西藏自治区水土资源承载力监测预警指标评分标准

Table 4 Standard list of indicators for early warning indexes of water and land resources carrying capacity in Tibet Autonomous Region

指标	分值					
	0	1	2	3	4	5
人均水资源占有量/ m^3	$< 1\ 760$	$[1\ 760,2\ 000)$	$[2\ 000,4\ 000)$	$[4\ 000,6\ 000)$	$[6\ 000,8\ 000)$	$\geq 8\ 000$
区域用水总量/ $\text{亿}\text{m}^3$	> 37	$[37,35)$	$[35,33)$	$[33,31)$	$[31,30)$	≤ 30
万元工业增加值耗水/ m^3	> 350	$[350,325)$	$[325,300)$	$[300,275)$	$[275,250)$	≤ 250
万元GDP耗水/ m^3	> 480	$[480,450)$	$[450,420)$	$[420,390)$	$[390,360)$	≤ 360
水功能区水质达标率/%	< 95.0	$[95.0,95.5)$	$[95.5,96.0)$	$[96.0,96.5)$	$[96.5,97.0)$	≥ 97.0
人均粮食产量/ kg	< 300	$[300,350)$	$[350,400)$	$[400,450)$	$[450,500)$	≥ 500
人均耕地面积/ m^2	< 700	$[700,850)$	$[850,1\ 000)$	$[1\ 000,1\ 150)$	$[1\ 150,1\ 300)$	$\geq 1\ 300$
草畜平衡指数/%	> 80	$[80,60)$	$[60,40)$	$[40,20)$	$[20,0)$	≤ 0
城市人均建设用地数量/ m^2	$> 1\ 500$	$[1\ 500,1\ 000)$	$[1\ 000,500)$	$[500,200)$	$[200,150)$	≤ 150
草地退化程度/%	< -50	$[-50,-30)$	$[-30,-10)$	$[-10,10)$	$[10,30)$	≥ 30
生态用地占比/%	< 40.0	$[40.0,50.0)$	$[50.0,60.0)$	$[60.0,70.0)$	$[70.0,80.0)$	≥ 80.0

表5 2005—2014年西藏自治区水土资源承载力综合监测预警指标标准化结果

Table 5 Standardization of early warning indicators for comprehensive monitoring of land and water carrying capacity of Tibet Autonomous Region from 2005 to 2014

年份	人均水资源占有量	区域用水总量	万元工业增加值耗水	万元GDP耗水	水功能区水质达标率	人均粮食产量	人均耕地面积	草畜平衡指数	城市人均建设用地数量	草地退化程度	生态用地占比
2005	0.192 5	0.365 6	0.312 8	0	0.250	0.057 1	0.146 2	0.438 6	0.025 50	0	0.093 9
2006	0.192 5	0.182 8	0	0	0.250	0.057 1	0.146 2	0.438 6	0.025 50	0	0.093 9
2007	0.192 5	0.182 8	0	0	0.250	0.057 1	0.146 2	0.438 6	0.025 50	0.093 8	0.093 9
2008	0.192 5	0	0	0	0.250	0.057 1	0.146 2	0.584 8	0.025 50	0.093 8	0.093 9
2009	0.192 5	0.731 2	0	0	0.125	0.057 1	0.146 2	0.584 8	0.012 75	0	0.093 9
2010	0.192 5	0.182 8	0	0	0	0.057 1	0.146 2	0.584 8	0.012 75	0.093 8	0.093 9
2011	0.192 5	0.731 2	0.078 2	0	0	0.057 1	0.146 2	0.584 8	0.012 75	0.093 8	0.093 9
2012	0.192 5	0.914 0	0.234 6	0.156 4	0	0.057 1	0.146 2	0.731 0	0.012 75	0	0.125 2
2013	0.192 5	0.731 2	0.234 6	0.312 8	0.375	0.057 1	0.146 2	0.731 0	0.012 75	0.093 8	0.125 2
2014	0.192 5	0.731 2	0.312 8	0.391 0	0.500	0.057 1	0.146 2	0.731 0	0	0	0.125 2

2018年6月

测预警阈值划分详见表6。2005—2014年西藏自治区水土资源承载力综合监测预警结果详见表7。

表6 西藏自治区水土资源承载力综合监测预警阈值区间

Table 6 Comprehensive monitoring and pre-warning threshold of water and land resources carrying capacity in Tibet Autonomous Region

标准化值	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5]
监测预警等级	I	II	III	V	IV
监测预警区间	红色	橙色	黄色	蓝色	绿色

西藏自治区水土资源综合承载监测预警动态变化表现为:区域水土资源综合承载力呈现正向变化趋势,在2005—2011年间处于橙色预警区间,自2012年起,区域水土资源承载力提升较为明显,2012年上升至黄色预警区间,2013年和2014年为蓝色预警区间。

从水土资源综合承载力监测预警结果来看,2005—2011年间,区域水土资源综合承载力处于橙色预警区间,随着地区科技水平的提高和绿色发展理念的增强,区域水资源利用效率逐步提高、水质达标率上升、草地载畜压力降低、生态用地面积持续增加;自2012年起,区域水土资源综合承载力提升较为明显,2012年上升至黄色预警区间,2013年和2014年为蓝色预警区间。区域水土资源综合承载能力呈现正向变化趋势,但草地退化问题仍在持续,区域水土资源综合承载力有待进一步提高。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)构建了由1个目标层、2个准则层、4个要素层及11个监测预警指标组成的西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系,对西藏自治区2005—2014年水土资源承载力监测预警实证分析表明,该指标体系可以较好地反映西藏自治区水土资源承载力动态特征,可以应用于区域水土资源承载力监测预警实践。

(2)2005—2014年,西藏自治区水资源承载力

监测预警指标中,除人均水资源占有量下降,其余指标均呈正向变化趋势,到2014年地区水资源承载力未达到预警风险;土地资源承载力监测预警指标中,人均粮食产量、人均耕地面积、城市人均建设用地面积和草地退化程度预警等级较高,多年处于橙色或红色预警区间。水功能区水质达标率、人均粮食产量、人均耕地面积以及草地退化程度等对区域水土资源承载力影响较为明显,应加强应对和调控。

(3)基于西藏自治区水土资源承载力动态监测预警分析,应加强对西藏自治区水土资源承载力调控,包括保障地区水功能区水质达标率,控制区域用水总量;保护现有耕地面积,提高单位面积粮食产出,加大生态修复工程实施力度,遏制草地退化速度,进一步提升区域水资源综合承载力。

4.2 讨论

本研究构建的西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系,可以为其他区域资源环境承载力监测预警研究提供参考。监测预警指标体系首要考虑和选择了能够体现资源环境约束的关键指标,同时要符合区域实际,做到约束性与区域性相结合,如西藏自治区的草地退化程度、生态用地占比等指标具有明显的区域性;其次,监测预警指标选取要兼顾综合性与主导性,如草畜平衡指数可以综合反映畜牧活动压力,人均水资源占有量则是反映水资源量的主导指标;再者,指标选择要注重层次,尽可能兼顾资源、环境、生态不同方面,各指标之间又需要相互独立;同时,监测预警指标体系既要满足科学性,还要具有可操作性。

研究也还存在若干不确定性。例如,专家打分过程中,将水土资源作为一个整体来看,计算得出的权重仅适用于水土资源承载力综合监测预警,单项指标的短板对水土资源承载力的影响难以得到体现。同时,西藏自治区畜牧业发达,区域内牲畜数量众多,牲畜需水量较大,是造成地区人均用水

表7 2005—2014年西藏自治区水土资源承载力综合监测预警结果

Table 7 Water and land resources carrying capacity comprehensive monitoring and early warning results in Tibet Autonomous Region from 2005 to 2014

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
监测预警结果	1.882	1.387	1.480	1.444	1.943	1.364	1.990	2.570	3.012	3.187
监测预警等级	橙色	橙色	橙色	橙色	橙色	橙色	橙色	黄色	蓝色	蓝色

量高居不下的原因之一。由于缺乏实测数据及实地调研资料,无法合理估算区域性畜饮水总量,因此本文在构建监测预警指标体系中未考虑牲畜用水量指标。此外,西藏自治区地处青藏高原,高寒冻土及冰川分布广泛,未利用地面积大但不宜开发,本研究暂未对西藏自治区未利用地承载状况展开研究。未来可开展对单项指标的短板造成的影响的研究,并加强对区域性畜需水量的实地调研及未利用地潜在利用能力分区调查,不断完善西藏自治区水土资源承载力监测预警指标体系。此外,定量评价区域可以承载的人口和经济总量,据此开展资源环境承载力监测预警,也是重要的研究方向。

参考文献(References):

- [1] 樊杰,王亚飞,汤青,等.全国资源环境承载力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J].地理科学,2015,35(1): 1-10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity(V 2014)[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 1-10.]
- [2] 国务院.关于建立资源环境承载力监测预警长效机制的若干意见[EB/OL]. (2017-09-20)[2017-10-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/20/content_5226466.htm. [State Council. Several Opinions on Establishing a Long-Term Mechanism for Monitoring and Early Warning of Resources and Environmental Bearing Capacity[EB/OL]. (2017-09-20)[2017-10-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/20/content_5226466.htm.]
- [3] 封志明,杨艳昭,江东,等.自然资源资产负债表编制与资源环境承载力评价[J].生态学报,2016,36(22): 7140-7145. [Feng Z M, Yang Y Z, Jiang D, et al. The compilation of natural resources balance sheets(NRBS) and the evaluation of resources and environment carrying capacity(RECC)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7140-7145.]
- [4] 陆大道,樊杰.区域可持续发展研究的兴起与作用[J].中国科学院院刊,2012,27(3): 290-300. [Lu D D, Fan J. The rise and function of regional sustainable development[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 290-300.]
- [5] 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[J].资源科学,2017,39(3): 379-395. [Feng Z M, Yang Y Z, Yan H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: from theory to practice[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [6] 袁国华,郑娟尔,贾立斌,等.资源环境承载力评价监测与预警思路设计[J].中国国土资源经济,2014,(4): 20-24.[Yuan G H, Zheng J E, Jia L B, et al. Evaluation of resource and environment carrying capacity and design of early warning[J]. *China Land and Resources Economy*, 2014, (4): 20-24.]
- [7] 徐卫华,杨琰琰,张路,等.区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J].地理科学进展,2017,36(3): 306-312. [Xu W H, Yang Y Y, Zhang L, et al. Evaluation method and case study of regional ecological carrying capacity[J]. *Advances in Geography*, 2017, 36(3): 306-312.]
- [8] 张静,曾维华,吴舜泽,等.一种新的区域环境承载力评价预警方法及应用[J].生态经济(中文版),2016,32(2): 19-22. [Zhang J, Zeng W H, Wu S Z, et al. A new evaluation method and application of regional environmental carrying capacity[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(2): 19-22.]
- [9] 杨正先,张志锋,韩建波,等.海洋资源环境承载力超载阈值确定方法探讨[J].地理科学进展,2017,36(3): 313-319. [Yang Z X, Zhang Z F, Han J B, et al. Discussion on the method of determining the overload threshold of carrying capacity of marine resources and environment[J]. *Advances in Geography*, 2017, 36(3): 313-319.]
- [10] 关道明,张志锋,杨正先,等.海洋资源环境承载力理论与测度方法的探索[J].中国科学院院刊,2016,31(10): 1241-1247. [Guan D M, Zhang Z F, Yang Z X, et al. Exploration on the theory and measurement method of carrying capacity of marine resources and environment[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10): 1241-1247.]
- [11] 李宁,刘晋羽,谢涛.水资源环境承载力监测预警平台设计探讨[J].环境科技,2015,(2): 57-61. [Li N, Liu J Y, Xie T, et al. Discussion on the design of monitoring platform for water resources and environment carrying capacity[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, (2): 57-61.]
- [12] 毕婉君.中山市土地资源环境承载力预警机制分析[J].当代经济,2016,(11): 70-72. [Bi W J. Analysis on early warning mechanism of environmental carrying capacity of land resources in Zhongshan city[J]. *Contemporary Economy*, 2016, (11): 70-72.]
- [13] 杨渺,甘泉,叶宏,等.四川省资源环境承载力预警模型构建[J].四川环境,2017,36(1): 144-151. [Yang M, Gan Q, Ye H, et al. Construction of early warning model of resources and environment carrying capacity in Sichuan Province[J]. *Sichuan Environment*, 2017, 36(1): 144-151.]
- [14] 周伟,袁国华,罗世兴.广西陆海统筹中资源环境承载力监测预警思路[J].中国国土资源经济,2015,(10): 8-12. [Zhou W, Yuan G H, Luo S X. Early-warning and monitoring of land and sea resources and environment carrying capacity in Guangxi Province [J]. *China Land and Resources Economy*, 2015, (10): 8-12.]
- [15] 方创琳,贾克敬,李广东,等.市县土地生态-生产-生活承载力测度指标体系及核算模型解析[J].生态学报,2016,37(15): 5198-5209. [Fang C L, Jia K J, Li G D, et al. Analysis on the in-

2018年6月

- dex system and accounting model of land ecology-production-life carrying capacity in cities and counties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 37(15): 5198-5209.]
- [16] 王奎峰, 李娜, 于学峰, 等. 山东半岛生态环境承载力评价指标体系构建及应用研究[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 1018-1027. [Wang K F, Li N, Yu X F, et al. Construction and application of evaluation index system of ecological environment carrying capacity in Shandong Peninsula[J]. *Chinese Geology*, 2014, 41(3): 1018-1027.]
- [17] 郑佳怡, 付晓, 王辰星, 等. 区域环境承载力评价指标体系的构建—以黄河上游水电开发区域为例[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2228-2234. [Zheng J Y, Fu X, Wang C X, et al. Construction of evaluation index system of regional environmental carrying capacity—a case study of hydropower development area in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2228-2234.]
- [18] 王庆日, 谭永忠, 薛继斌, 等. 基于优度评价法的西藏土地利用生态安全评价研究[J]. 中国土地科学, 2010, 24(3): 48-54. [Wang Q R, Tang Y Z, Xue J B, et al. Study on evaluation of land use ecological security in Tibet based on goodness evaluation method[J]. *Chinese Land Science*, 2010, 24(3): 48-54.]
- [19] 廖晓勇, 陈治谏, 王海明, 等. 西藏土地利用综合分区[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 96-101. [Liao X Y, Chen Z J, Wang H M, et al. Integrated land use in Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(1): 96-101.]
- [20] 除多, Basanta Shrestha, 王伟, 等. 基于MODIS的西藏高原土地覆盖分类研究[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2152-2159. [Chu D, Shrestha B, Wang W, et al. Land cover classification based on MODIS in Tibetan Plateau[J]. *Resources Science*, 2010, 32(11): 2152-2159.]
- [21] 畅慧勤, 徐文勇, 袁杰, 等. 西藏阿里草地资源现状及载畜量[J]. 草业科学, 2012, 29(11): 1660-1664. [Chang H L, Xu W Y, Yuan J, et al. Present situation and carrying capacity of grassland resources in Tibet Ali[J]. *Grassland Science*, 2012, 29(11): 1660-1664.]
- [22] 李祥妹, 赵卫, 黄远林. 基于生态系统承载能力核算的西藏高原草地资源区划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(1): 167-173. [Li X M, Zhao W, Huang Y L. Study on regionalization of grassland resources in Tibetan Plateau based on ecosystem carrying capacity[J]. *China's Agricultural Resources and Regionalization*, 2016, 37(1): 167-173.]
- [23] 宗永臣, 拉姆次仁, 金建立. 西藏林芝地区水资源承载力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, (5): 37-42. [Zong Y C, Lamu R C, Jin J L. Study on water resources carrying capacity in Linzhi area of Tibet[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Conservancy Science and Technology*, 2012, (5): 37-42.]
- [24] 除多, 普穷, 旺堆, 等. 1974-2009年西藏羊卓雍错湖泊水位变化分析[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 239-247. [Chu D, Pu Q, Wang D, et al. Analysis on the change of water level in Yangzhuoyong Lake, Tibet from 1974 to 2009[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(2): 239-247.]
- [25] 安宝晟, 程国栋. 青藏铁路开通后对西藏生态足迹和生态承载力的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1292-1300. [An B S, Cheng G D. Impact of Qinghai-Tibet railway on ecological footprint and ecological carrying capacity of Tibet[J]. *Journal of Glacier and Permafrost*, 2013, 35(5): 1292-1300.]
- [26] 钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 等. 西藏高原生态安全研究[J]. 山地学报, 2010, 28(1): 1-10. [Zhong X H, Liu S Z, Wang X D, et al. Study on ecological security of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(1): 1-10.]
- [27] 西藏自治区统计局. 西藏统计年鉴(2005-2014)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2014. [Statistical Office of Tibet Autonomous Region. Tibet Statistical Yearbook (2005-2014)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2014.]
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2005-2014)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2005-2014)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2014.]
- [29] 中华人民共和国国土资源部. 中国国土资源年鉴(2005-2014)[M]. 北京: 中国国土资源年鉴编辑部, 2005-2014. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. China's Land and Resources Yearbook (2005-2014)[M]. Beijing: China Land and Resources Yearbook Editorial Office, 2005-2014.]
- [30] 西藏自治区水利厅. 西藏水资源公报(2005-2014)[M]. 拉萨: 西藏自治区水文水资源勘测局, 2005-2014. [Tibet Autonomous Region Department of Water Resources. Tibet Water Resources Bulletin (2005-2014) [M]. Lasa: Tibet Autonomous Region Hydrology and Water Resources Survey Bureau, 2005-2014.]
- [31] 农业部. 全国草原监测报告 2014[EB/OL]. (2015-04-14)[2017-10-15]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/jcyj/zh/201504/t20150414_4526567.htm2014. [Department of Agriculture. National Grassland Monitoring Report 2014 [EB/OL]. (2015-04-14)[2017-10-15]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/jcyj/zh/201504/t20150414_4526567.htm2014.]
- [32] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010, 19(2): 268-277.
- [33] 任春燕. 基于层次分析法的纸坊沟流域农业生态经济系统效益评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 214-217. [Ren C Y. Benefit evaluation of agricultural eco-economic system in Zhifanggou watershed based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4): 214-217.]
- [34] 丁明军, 张懿锂, 刘林山, 等. 1982-2009年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2114-2122.

- [Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, *et al.* Temporal and spatial variation of grassland cover in Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2009[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2114-2122.]
- [35] 边多, 普布次仁, 尼珍, 等. 基于MODIS-NDVI时序数据的西藏阿里地区草地覆盖时空变化[J]. 中国草地学报, 2014, 36(3): 73-78. [Bian D, Pubu R C, Ni Z, *et al.* Spatiotemporal variation of grassland cover in Tibet Ali region based on MODIS-NDVI timing data[J]. *Journal of Chinese Grassland*, 2014, 36(3): 73-78.]
- [36] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. [Zhang L P, Xia J, Hu Z F. Analysis of water resources and water security in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2009, 18(2): 116-120.]
- [37] 西藏自治区人民政府. 实行最严格水资源管理制度考核办法[Z]. 拉萨: 西藏自治区人民政府, 2014. [People's Government of Tibet Autonomous Region. Measures for the Implementation of the Strictest Water Resources Management System[Z]. Lasa: People's Government of Tibet Autonomous Region, 2014.]
- [38] 封志明, 杨艳昭, 张晶. 中国基于人粮关系的土地资源承载力研究: 从分县到全国[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 865-875. [Feng Z M, Yang Y Z, Zhang J. Study on the carrying capacity of land resources based on human-grain relationship in China: from county to national[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 865-875.]
- [39] 张利国, 陈苏. 中国人均粮食占有量时空演变及驱动因素[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 171-177. [Zhang L G, Chen S. Temporal and spatial evolution and driving factors of China's per capita grain [J]. *Journal of Economic geography*, 2015, 35(3): 171-177.]
- [40] 朱红波, 袁愿, 孙慧宁. 不同粮食购销模式下的耕地压力指数模型: 理论与实证[J]. 统计与决策, 2016, (18): 38-41. [Zhu H B, Yuan Y, Sun H N. Model of cultivated land pressure index under different grain purchase and sale: theory and demonstration[J]. *Journal of Statistics and Decision*, 2016, (18): 38-41.]
- [41] 杨丽霞. 基于耕地压力指数的杭州市粮食安全评价[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(1): 93-96. [Yang L X. Evaluation of grain security in Hangzhou City based on cultivated land pressure index [J]. *Journal of Agricultural Modernization*, 2014, 35(1): 93-96.]
- [42] 徐斌, 杨秀春, 金云翔, 等. 中国草原牧区和半牧区草畜平衡状况监测与评价[J]. 地理研究, 2012, 31(11): 1998-2006. [Xu B, Yang X C, Jun Y X, *et al.* Monitoring and evaluation of balancing situation of grass and livestock in pasture and semi-pastoral areas of China[J]. *Journal of Geographical Research*, 2012, 31(11): 1998-2006.]
- [43] 钱拴, 毛留喜, 侯英雨, 等. 青藏高原载畜能力及草畜平衡状况研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 389-397. [Qian S, Mao L X, Hou Y Y, *et al.* Study on the stocking ability and balance of grass and animal in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(3): 389-397.]
- [44] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137-2011)[EB/OL].(2012-01-01)[2017-10-15]. <https://baike.baidu.com/item/城市用地分类与规划建设用地标准/1450420?fr=aladdin2010>. [The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban Land Classification and Planning Construction Land Standards (GB50137-2011) [EB/OL].(2012-01-01)[2017-10-15]. <https://baike.baidu.com/item/城市用地分类与规划建设用地标准/1450420?fr=aladdin2010>.]
- [45] 赖敏, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 227-236. [Lai M, Wu S H, Yin Y H, *et al.* Ecological compensation amount based on ecosystem service value in Sanjiangyuan region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 227-236.]
- [46] 谭永忠, 赵越, 曹宇, 等. 中国区域生态用地分类的研究进展[J]. 中国土地科学, 2016, 30(9): 28-36. [Tan Y Z, Zhao Y, Cao Y, *et al.* Research progress of regional ecological land classification in China[J]. *Chinese Land Science*, 2016, 30(9): 28-36.]
- [47] 蒋利. 浅议西藏水资源的开发利用与保护[J]. 西藏科技, 2013, (9): 33-34. [Jiang L. Discussion on exploitation, utilization and protection of Tibetan water resources[J]. *Tibet Science and Technology*, 2013, (9): 33-34.]
- [48] 封志明. 中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障[J]. 人口研究, 2007, 31(2): 15-29. [Feng Z M. Food security and farmland protection in China's future population development[J]. *Journal of Population studies*, 2007, 31(2): 15-29.]

Research on monitoring and early warning of land and water resources carrying capacity in the Tibet Autonomous Region

GAO Jie^{1,3}, LIU Yujie^{1,2}, FENG Zhiming^{1,4}, PAN Tao^{1,2}, YANG Yanzhao^{1,4}, ZHANG Hao¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 610070, China;*

4. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Water and land resources are indispensable natural resources, whose carrying capacity for economic and social development is an important measure of the degree of coordination between society, land and regional sustainable development. Research on the surveillance and warning of water-land resources carrying capacity provides technical support for controlling regional resource environmental pressures. Under the case study of Tibet, taking into account resource, environmental and ecological attributes, we select key indicators to build a monitoring and early warning index system of regional water and land resources carrying capacity. The system includes water resources, water environment, productive land and ecological land. Based on international, national and industry standards, regulations and research, the key thresholds for different indicators are determined. We divided three warning levels into high to low as red, orange and yellow. From 2005 to 2014, using analytic hierarchy processes and expert scoring of the index system we found that indicators such as water quality compliance rate, per capita grain yield, per capita arable land area and grassland degradation degree significantly impact the regional water resource carrying capacity. Land resources need to be strengthened. The comprehensive carrying capacity of regional water and land resources has increased. The orange warning interval has down to the blue warning interval, meaning that regional water and land resources have improved.

Key words: water-land resources carrying capacity; the surveillance and warning; index system; Tibet Autonomous Region