

甘肃省白龙江流域生态承载力的时空变化

巩杰, 柳冬青, 马学成, 张金茜

(兰州大学 资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 从土地利用角度开展甘肃省白龙江流域生态承载力时空变化研究, 为该流域生态环境治理和可持续发展提供科学依据。[方法] 基于生态足迹理论, 利用 1990, 2002, 2010, 2014 年 4 期土地利用数据与 GIS 空间分析技术, 对近 25 a 来流域生态承载力时空变化进行空间可视化表达和定量分析。[结果] ① 时间尺度上, 25 a 来流域生态承载力呈现“降—升—降”的波动变化趋势, 各地类生态承载力变化趋势不同。② 空间尺度上, 流域生态承载力总体呈现西北与西南部高, 东北部低, 随海拔和坡度增加而递增的不均匀分布格局; 随时间推移, 流域不同区域和坡度范围的生态承载力变化趋势各异。③ 1990—2002 年, 2002—2010 年, 2010—2014 年间流域各地类生态承载力转换频繁, 转变趋势明显, 导致近 25 a 来流域生态承载力及其内部组成变化较大。[结论] 近 25 a 来流域生态承载力在波动中上升, 流域生态质量有所改善; 受地形地貌和土地利用/覆被变化的影响, 流域生态承载力具有明显的空间异质性。退耕还林还草政策是流域生态承载力变化的主要影响因素之一。

关键词: 生态承载力; 时空变化; 转移矩阵; 甘肃省白龙江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0242-06

中图分类号: K903

文献参数: 巩杰, 柳冬青, 马学成, 等. 甘肃省白龙江流域生态承载力的时空变化[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 242-247. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.041; Gong Jie, Liu Dongqing, Ma Xuecheng, et al. Spatiotemporal change of ecological carrying capacity in Bailongjiang watershed of Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 242-247. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.041

Spatiotemporal Change of Ecological Carrying Capacity in Bailongjiang Watershed of Gansu Province

GONG Jie, LIU Dongqing, MA Xuecheng, ZHANG Jinxi

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education,

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] Bailongjiang Watershed was selected as a case to study the spatiotemporal change of ecological carrying capacity(ECC) and its driving mechanism from the perspective of land use change for the purpose of the ecological environment management and sustainable development of the watershed. [Methods] Based on the theory of ecological footprint, the spatial and temporal changes of the ECC of the watershed during the latest 25 years were analyzed by the remote sensing data and transfer matrix analysis method from 1990 to 2014. [Results] ① On the time scale, the ECC of watershed during the latest 25 years changed with a general trend of “decrease-increase-decrease”, but had different trend for different land use type. ② On the spatial scale, the watershed ECC showed an uneven spatial distribution: the area with higher value located in the northwestern and southwestern parts, and the area with low value located in the north-eastern parts; the higher of the altitude and gradient, the higher of ECC. ③ From 1990 to 2002, 2002 to 2010 and 2010 to 2014, the change of the watershed ECC varied frequently with apparent transfer, respectively. [Conclusion] The watershed ECC fluctuated increasingly while the ecological quality was improved

收稿日期: 2017-04-17

修回日期: 2017-06-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向社会—生态脆弱性适应的易灾型流域生态系统服务权衡与管控”(41771196); 甘肃省民生科技计划项目“天水南部山区地质灾害监测预警、生态—经济发展研究与集成示范”(1503FCME006)

第一作者: 巩杰(1975—), 男(汉族), 甘肃省宁县人, 博士, 硕士生导师, 主要从事景观生态学、土地变化科学、生态系统服务、环境遥感与生态评价等研究。E-mail: jgong@lzu.edu.cn.

during the latest 25 a. The spatial pattern of the watershed ECC changed with obvious spatial heterogeneity due to the landform characteristics and land use/cover change, the grain for green project also affected the change of watershed ECC.

Keywords: ecological carrying capacity; spatiotemporal change; transfer matrix; Bailongjiang watershed of Gansu Province

生态承载力是指在特定时间和范围内生态系统的自我维持与调节能力、资源与环境子系统的供容能力及社会经济子系统的持续发展能力^[1],可用于指示区域可持续发展水平。在区域生态承载力范围内,如何有效协调“自然—经济—社会”复合系统,实现区域可持续发展,是近年来国内外学者和管理人员关注的重要议题^[2-3]。生态足迹理论模型经 Rees 等^[4-5]提出并完善后,因其较为科学的理论基础和普适性度量指标,成为常用的生态承载力评估方法之一^[6]。该方法利用生物生产性土地面积来定量描述人类活动与生态供给间的供需关系,借用区域生态系统实际能够提供给人类的各种土地利用类型面积与其相应地类的生产力乘积总和来指示该区域的生态承载力^[7]。可见,区域生态承载力与其土地利用/覆被变化关系密切,具有明显的空间关联性和空间异质性^[8]。基于此,国内外学者利用国家或各省市统计资料及土地利用数据在不同区域尺度上开展了大量研究^[9-13],流域作为一个特殊的自然地理单元,近年来也备受关注^[14-15]。虽然,这种基于土地生产能力的生态承载力计算,局限于生态系统服务功能的生产性供给服务,忽视了生态系统功能的多样性和复杂性^[16],考虑到生态足迹法可以将人类对自然的索取及环境的承载程度转化为生物生产性土地面积,结果直观明了,尤其在引入均衡因子和产量因子后使得结果更具可比性,因此对评价一定时期内区域生态承载力仍具有一定指导意义^[17]。

甘肃省白龙江流域作为青藏高原向黄土高原过渡的自然地理单元,地貌复杂多样、地质灾害多发、水土流失严重,加之人类活动复杂多样,流域生态风险较为突出,严重威胁流域内的生态安全^[18-19]。退耕还林还草工程实施后,流域土地利用/覆被变化显著^[20],深刻地影响着区域生态承载力的时空格局和变化过程,进而影响着流域“自然—经济—社会”复合系统稳定性与可持续发展。因此,本文以甘肃省白龙江流域为例,基于1990,2002,2010,2014年土地利用数据和地理空间分析方法,开展近25a来流域生态承载力时空动态变化分析,探讨流域生态承载力组成结构及其时空变化特征,旨在为流域生态环境治理和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白龙江是长江一级支流嘉陵江上游的最大支流,其甘肃省段全长475 km,地处甘肃省东南部山区(32°36′—34°24′N,103°00′—106°30′E),行政单元主要包括迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区和文县,流域面积为 $1.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域属西秦岭与岷山构造山地,沟壑纵横,素以“山大沟深”著称,地势西北高东南低,主要地貌类型有高原山地地貌、河谷地貌及黄土地貌等。气候类型复杂多样,属暖温带向北亚热带过度的气候交错带,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,年均温6~14.9℃,年降水量约400~850 mm,且主要集中在5—10月。

1.2 数据源及处理

研究所用数据主要有1990,2002,2010,2014年4期Landsat TM/ETM+遥感影像、30 m分辨率DEM高程数据(来源于中国科学数据库 <http://www.gscloud.cn>)和人口数据(来源于《甘肃省统计年鉴》)。参考国土资源部2007年颁布的《土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007)》,结合研究区实际情况,采用人工目视解译法,将土地利用划分为林地、草地、耕地、建设用地、水域和未利用地等6类,然后结合地形图和Google Earth高分辨率影像(2014年),对土地利用解译结果和植被覆盖情况进行野外选点验证以及访谈当地居民,经统计各土地利用与覆被的解译精度均在84%以上,最终获得1990—2014年4期甘肃省白龙江流域土地利用图。

1.3 研究方法

1.3.1 生态承载力模型 区域生态承载力指一定时期内(通常为1a)区域能够提供给人类的所有可用生物生产性土地和水域面积的总和,即生态供给^[20]。计算公式如下:

$$EC = N \cdot ec = N \cdot \sum w_i y_i a_i \quad (1)$$

式中:EC——总生态承载力;N——总人口数;ec——人均生态承载力; a_i ——实际人均占有的*i*类生物生产性土地面积; w_i ——均衡因子,即区域内某类生物生产性土地的生承载力与该区域所有生物生产性土地平均生产力的比值^[15,20]; y_i ——产量因子,即区域内某类生物生产性土地的生物产量与该类土地世界平均产量的比率^[21]。计算中将生物生产性土地面积

单位“ $\text{hm}^2/(\text{hm}^2)$ ”转换成基于全球平均生产力的“全球 $\text{hm}^2/(\text{g} \cdot \text{hm}^2)$ ”。按联合国世界环境与发展委员会(WCED)《我们共同的未来》建议:生态供给中扣除 12%的生物生产性面积用作保护生物多样性^[22-23]。

“均衡因子”和“产量因子”是影响生态承载力计算的主要参数。前期研究中多采用 Wachernagel^[1]在《国家生态足迹》报告中公布的中国各地类生态承载力数值。但中国幅员辽阔,各地气候和土壤等条件差异明显,因而各区域土地生产力水平不同,若直接使用全国通用因子,很难直观、准确地反映局部区域的真实状况。参考相关文献,结合研究区基本情况,本文选用潘竟虎等^[24]根据甘肃省各区域 NPP 计算所得的均衡因子和产量因子。

1.3.2 生态承载力计算 基于 GIS 平台和生态承载力模型,将流域 4 期土地利用图的属性表与 6 类土地生态承载力的均衡因子、产量因子及流域内总人口数相关联,计算获得 6 类土地的生态承载力(表 1),进而获得流域内各地类生态承载力占比(附图 8)。由于生态承载力大小受斑块面积的影响,尚不能准确体现生态承载力的空间差异性,因此本研究以各土地利用类型的均衡因子与产量因子的乘积表示各地类的生态承载力,得到流域 4 期生态承载力空间分布图(图 2)。其次,将生态承载力空间分布图与流域坡度图叠置分析,获得 5 个坡度分级的单位面积生态承载力(图 2)。最后,根据 4 期土地利用图,获得流域 3 个时段各类土地利用转移矩阵,并计算各类土地生态承载力转移矩阵(表 2),进一步分析土地类型变化所引起的承载力内部组分变化及其特征。

2 结果与分析

2.1 甘肃省白龙江流域生态承载力时间变化分析

近 25 a 来甘肃省白龙江流域生态承载力呈现出

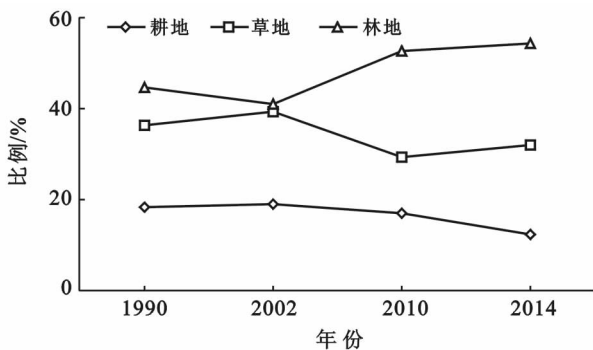


图 1 1990—2014 年甘肃省白龙江流域各类土地生态承载力占总生态承载力的比例

2.2 甘肃省白龙江流域生态承载力空间分异

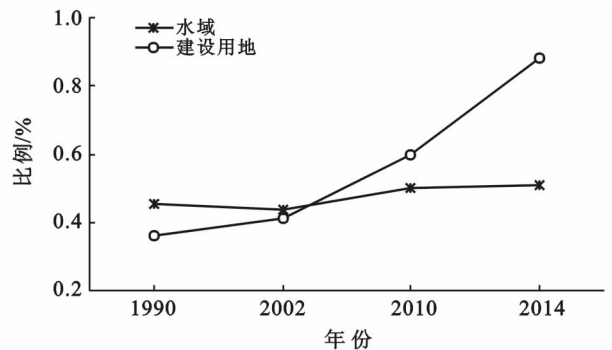
甘肃省白龙江流域生态承载力呈现出西北与西

“降—升—降”的波动趋势,3 个时段内生态承载力年均增长率分别为: -0.01% , 0.07% 和 -0.04% (表 1)。各地类生态承载力所占比例不均匀,且随着时间的推移呈不同的变化趋势(图 1)。其中,林地生态承载力的比例最高,各期均占总生态承载力的 40%以上,2002 年之前呈下降趋势,而后持续升高。草地生态承载力所占比例次之,且在波动中有所下降。耕地生态承载力比重变化趋势与林地基本相反,2002 年之前呈增加趋势,而后持续减少。水域和建设用地区生态承载力所占比例不大(在 $0.30\% \sim 0.90\%$ 之间),前者在波动中有所上升;后者持续增长。前三者的剧烈变化均以 2002 年为拐点,主要是 1999 年退耕还林还草政策实施后,大面积坡耕地和草地转化为林地等导致的。2010 年后草地生态承载力有所增加,这主要是由于退耕还林还草政策的实施以及村民外出务工等,致使部分耕地撂荒并转化为草地,在一定程度上改善了流域生态环境。

表 1 甘肃省白龙江流域 1990—2014 年生态承载力变化 10^4 hm^2

土地利用类型	生态承载力			
	1990 年	2002 年	2010 年	2014 年
耕地	72.26	74.71	67.21	48.90
草地	143.67	155.61	117.30	127.63
林地	178.02	162.93	209.80	216.05
水域	1.80	1.73	2.00	2.03
建设用地	1.44	1.63	2.39	3.50
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00
12%生物保护面积	397.18	396.61	398.70	398.11
合计	47.66	47.59	47.84	47.77

注:按世界环境与发展委员会(WCED)的报告《我们共同的未来》建议,生态供给中扣除 12%的生物生产性面积用来保护生物多样性。



南部高,东北部低的空间不均匀分布,且随海拔升高,生态承载力整体递增(附图 8)。在坡度分布上,以 25

~35°区带为界,生态承载力表现出先增加后减小的趋势(图2)。近25 a来甘肃省白龙江流域生态承载力色度以绿色为主,且在波动中逐渐吞噬灰、黄色,说明流域内大部分区域的生态承载力较高,并呈波动上升趋势(2002—2010年间尤为明显),各县区生态承载力变化趋势却不同(附图8)。其中,白水江南岸区域、拱坝河中上游、迭部县大部分、岷江西岸至迭山,以及武都区东南部等山区的生态承载力最大。宕昌县北部、舟曲—武都—文县段河谷地带及以北区域生态承载力较大。以2002年为拐点,由于大面积退耕还林还草,景观破碎性降低,生态承载力片状分布增加(如白水江以南)。河谷近岸区由于退耕还林还草(主要是退耕还草)的影响,其生态承载力有所降低,尤以白龙江武都段和白水江两岸最为显著。舟曲及其临界的高山区生态承载力较低,其中以舟曲县西北部与迭部县交界处最为明显;流域西北部的迭部县北部高山带生态承载力最低,但变化不大(附图8)。巩杰等^[2]研究发现,宕昌—武都—文县一带为海拔低、坡度小的区段,人口密度大且对土地利用的改变较

大,因而,该区段生态承载力波动也较大(附图8)。

1990—2014年,流域不同坡度上生态承载力表现出不同的变化趋势。在0°~35°区段,生态承载力随坡度增加而增加,35°以上区段骤减(图2)。这与各坡度段林地所占比重变化大致相似,而35°以上区段出现骤减,这与该区段裸岩、高山积雪等未利用地比重大,水域比重小有关(图3)。各坡度段,生态承载力年际变化与其在流域尺度上变化一致,也体现出“降—升—降”的波动上升趋势。

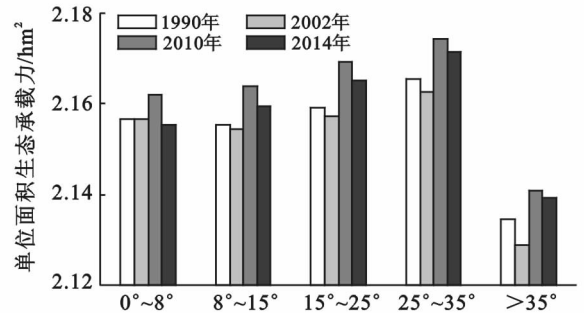


图2 甘肃省白龙江流域1990—2014年生态承载力坡度分布

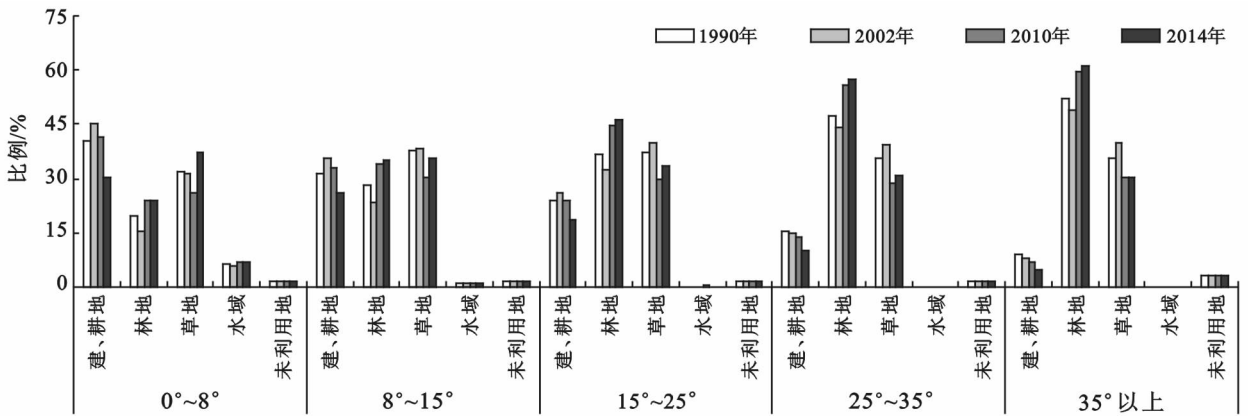


图3 甘肃省白龙江流域1990—2014年地类比重与坡度分布关系

2.3 流域各类土地生态承载力转移动态分析

为进一步揭示甘肃省白龙江流域内部生态承载力时空变化特征,基于3个时段的土地利用/覆被变化计算得到流域各类土地生态承载力转移矩阵(表2)。在1990—2014年间的3个时段内,白龙江流域生态承载力整体相对稳定的同时,各类土地生态承载力转移较为频繁,而且转移方向以及转移趋势各有不同。1990—2002年,由于草地开垦、植林和未利用地的改善利用等,流域生态承载力有所增长(14 861.07 hm^2),但同时,耕地弃耕和林地退化(主要转为草地和未利用地)等致使耕地和林地生态承载力大量减少(-16 427.99 hm^2),流域生态承载力下降较大(-5 723.93 hm^2)。2002—2010年,虽然退耕还林还草和部分林地退化,致使流域生态承载力减少了

5 071.71 hm^2 ,但未利用地的持续改善利用(特别是荒地的植树种草),生态承载力增长量却高达11 060.92 hm^2 ,流域生态承载力剧增(20 940.05 hm^2)。

2010—2014年间,耕地生态承载力进一步减少(达3 660.76 hm^2),林地转为其他用地(尤其是草地)后的生态承载力减少量较大(-9 783.65 hm^2),而流域因地类转移的增加量仅有7 762.45 hm^2 ,流域生态承载力大幅下降(5 810.00 hm^2)。结合附图8可知,武都区东南部大面积林地转为草地生态承载力,是流域生态承载力大幅下降的原因。由表2可见,近25 a来,草地和林地向耕地生态承载力的转移量逐步减少,而耕地向草地和林地生态承载力的转移量却持续增长。这主要是退耕还林还草政策导致的生态承载力响应之一。综上所述,生态承载力转移矩阵不仅能

够展示土地利用类型的转移方向,而且可以揭示因土地类型变化所引起的生态承载力内部组分的变化及

其特征,可为深入理解流域生态承载力时空动态变化提供依据。

表 2 省白龙江流域 1990—2014 年生态承载力转移矩阵

hm²

研究时段	地类	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	合计
1990—2002 年	草地	0.00	-1 353.82	-1.21	-11 989.34	-1.30	5337.17	-8 008.49
	耕地	1 448.19	0.00	0.00	-675.78	-1.62	325.81	1 096.60
	建设用地	8.93	0.00	0.00	-5.40	-0.14	0.00	3.39
	林地	7 361.07	265.53	0.81	0.00	0.00	122.49	7 749.90
	水域	0.60	0.51	0.23	-0.30	0.00	0.00	1.03
	未利用地	-4 163.01	-387.15	0.00	-2 016.20	0.00	0.00	-6 566.36
	合计	4 655.78	-1 474.93	-0.17	-14 687.02	-3.06	5 785.47	-5 723.93
2002—2010 年	草地	0.00	-1 605.98	-7.37	-2 932.31	-0.28	8 723.03	4 177.09
	耕地	1 060.00	0.00	0.00	-305.33	-0.47	0.00	754.20
	建设用地	17.70	0.00	0.00	-14.84	-0.06	0.00	2.80
	林地	18 687.44	765.73	9.83	0.00	0.92	2 337.89	21 801.82
	水域	13.05	2.68	0.13	-4.60	0.00	0.00	11.26
	未利用地	-4 830.06	-366.69	0.00	-610.38	0.00	0.00	-5 807.12
	合计	14 948.14	-1 204.26	2.59	-3 867.45	0.11	11 060.92	20 940.05
2010—2014 年	草地	0.00	-2 743.28	-29.30	-7072.02	-37.11	3 960.89	-5 920.82
	耕地	937.78	0.00	0.00	-576.13	-1.70	1 131.61	1 491.56
	建设用地	27.14	0.00	0.00	-37.40	-0.46	76.38	65.66
	林地	8 929.17	894.80	14.29	0.00	5.73	758.97	10 602.96
	水域	13.07	3.14	0.26	-36.93	0.00	0.00	-20.47
	未利用地	-8 072.55	-1 815.43	-79.75	-2 061.18	0.00	0.00	-12 028.90
	合计	1 834.60	-3 660.76	-94.50	-9 783.65	-33.54	5 927.85	-5 810.00

注:矩阵表示从 i 类土地利用类型转变为 j 类土地利用类型后;转移面积 EC 的变化量;+表示增加量;-表示减少量。

3 讨论与结论

(1) 时间尺度上,甘肃省白龙江流域生态承载力结构中各地类生态承载力所占比例不同。其中,耕地、林地和草地生态承载力变化最为明显,流域生态承载力总体呈现为“降—升—降”变化趋势。

(2) 空间尺度上,甘肃省白龙江流域生态承载力总体呈现西北与西南部高,东北部低的空间不均匀分布格局,且随海拔和坡度的增加而增加。流域生态承载力具有明显的空间异质性,与地貌、土地利用/覆被变化具有一定的地理关联性。这与汪玉琼等^[11]发现的石羊河流域上游山区生态承载力分布规律相反,这主要是由于汪玉琼等是基于全国尺度的均衡因子和产量因子计算西北干旱区的生态承载力^[11],一定程度上高估了耕地的生产能力,而且其研究区耕地随海拔与坡度的增加而减少,从而导致生态承载力与海拔、坡度呈负相关。本研究中采用地域性因子,林地的生产力较耕地的大,流域生态承载力与地形因子的相关性将更具地域合理性。

(3) 研究时段内(1990—2002 年,2002—2010

年,2010—2014 年)流域各地类生态承载力转移频繁,转向趋势明显,林、草地间生态承载力的转移最大,草地和林地间生态承载力的转移量逐步减少,而耕地向草地和林地生态承载力的转移量却持续增长;未利用地由于生产力极低,其与其他各地类间的转变,将在很大程度上影响生态承载力的变化。这些都导致近 25 a 来甘肃省白龙江流域生态承载力及其内部组成变化较大。这也说明土地利用/覆被变化是流域生态承载力变化的主导因素,1999 年退耕还林还草政策的实施(尤其是对未利用地植树造林等生态建设工程)是 2002 年后流域生态承载力变化的主要驱动力。这与前人在其他区域的生态承载力变化机制研究结果相似^[25-27]。

(4) 甘肃省白龙江流域生态承载力空间分布的不均匀性是客观存在的。流域生态承载力变化只能表征流域生态承载力的绝对变化量,尚不能准确体现流域各地类生态承载力的相对变化量。而流域各地类生态承载力的转移可以清晰地表示流域生态承载力各组分结构变化及其动态特征,因此,多尺度下流域生态承载力时空变化及其机制分析将是下一步主

要研究内容之一。

(5) 本研究中所用“均衡因子”和“产量因子”为潘竟虎根据甘肃省各区域 NPP 计算所得的各地类生态承载力数值,虽然为省市尺度上的参数,但与流域内各地类的生态生产力状况较为符合(森林和水资源相对丰富,高山草地的草牧业产量高,土石山区耕地较为浅薄贫瘠等)研究结果虽然具有一定的误差,但能客观反映流域生态承载力的时空变化。建议后期开展该流域净初级生产力或“流域公顷”分析,估测该地区 4 个年份的均衡因子和产量因子,并与本研究进行对比,为甘肃省南部山区因地制宜地开展白龙江流域生态环境综合治理和可持续发展提供科学服务。

[参 考 文 献]

- [1] 高吉喜. 可持续发展理论探索:生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001.
- [2] Peng Jian, Du Yueyue, Liu Yanxu, et al. How to assess urban development potential in mountain areas?: An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled Human and natural systems [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60:1017-1030.
- [3] 熊建新,陈端吕,彭保发,等. 洞庭湖区生态承载力及系统耦合效应[J]. *经济地理*, 2013, 33(6):155-161.
- [4] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. *Environ Urbanization*, 1992, 6(2):121-130.
- [5] Rees W E, Wackernage L M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy[J]. *Focus*, 1996,6(2):121-130.
- [6] Kitzes J, Galli A, Bagliani M, et al. A research agenda for improving national ecological footprint accounts[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7):1991-2007.
- [7] 江宝骅,蓝欣,郑娇玉,等. 石羊河流域中下游绿洲生态承载力时空转移变化[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2015,51(5):625-632.
- [8] 汪玉琼,郭建军,李凯,等. 石羊河流域上游山区生态承载力时空格局动态评价[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2013,49(2):166-172.
- [9] Irankhahi M, Jozi S A, Farshchi P, et al. Combination of GISFM and TOPSIS to evaluation of Urban Environment Carrying Capacity (Case study: Shemiran City, Iran)[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017,14(6):1-16.
- [10] Elisa S N, Enrique O. Carrying capacity using energy and a new calculation of the ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60:1200-1207.
- [11] 田玲玲,罗静,董莹,等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016,25(2):316-325.
- [12] 刘东,封志明,杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. *自然资源学报*, 2012,27(4):614-624.
- [13] 张乐勤,陈素平,荣慧芳,等. 安徽省池州市 2001—2010 年可持续发展动态测度与分析[J]. *地理研究*, 2012,31(3):439-449.
- [14] 彭资,谷成燕,刘智勇,等. 东江流域 1989—2009 年土地利用变化对生态承载力影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 28(7):675-686.
- [15] 郭荣中,申海建. 基于生态足迹的澧水流域生态补偿研究[J]. *水土保持研究*, 2017,24(2):353-358.
- [16] 赵雪雁,刘霜,赵海莉. 基于能值分析理论的生态足迹在区域可持续发展评价中的应用:以甘肃省为例[J]. *干旱区研究*, 2011,28(3):524-531.
- [17] 杨屹,加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化[J]. *生态学报*, 2015,35(24):7987-7997.
- [18] 巩杰,赵彩霞,谢余初,等. 基于景观格局的甘肃省白龙江流域生态风险评估与管理[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7):2041-2048.
- [19] 谢余初,巩杰,张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, 35(6):790-797.
- [20] 高彦净,谢余初,钱大文. 等. 甘肃省白龙江流域植被覆盖度及景观格局变化[J]. *水土保持研究*, 2015,22(1):181-187.
- [21] 马倩怡,林金煌,林惠花. 基于生态足迹的天水市生态承载力动态变化研究[J]. *亚热带水土保持*, 2016,28(3):15-19.
- [22] 常斌,熊利亚,侯西勇,等. 基于空间的生态足迹与生态承载力预测模型:以甘肃省河西走廊地区为例[J]. *地理研究*, 2007,26(5):940-948.
- [23] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. *Ecological Economics*, 1999,29(3):375-390.
- [24] 潘竟虎,冯娅娅. 甘肃省潜在生态承载力估算[J]. *生态学杂志*, 2017,36(3):800-808.
- [25] 巩杰,高彦净,张玲玲,等. 基于地形梯度的景观生态风险空间分析:以甘肃省白龙江流域为例[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2014,50(5):692-698.
- [26] 郝仕龙,李春静. 黄土丘陵区土地利用/覆盖变化对生态承载力的影响:以固原上黄试验区为例[J]. *水土保持研究*, 2013,20(2):135-139.
- [27] 岳东霞,杜军,刘俊艳,等. 基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价[J]. *生态学报*, 2011,31(9):2550-2558.