

DOI: 10.5846/stxb201711302153

岳东霞, 杨超, 江宝骅, 郭建军, 徐晓锋. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测. 生态学报, 2019, 39(6): - .

Yue D X, Yang C, Jiang B H, Guo J J, Xu X F. Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River Basin on the basis of the CA-Markov model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测

岳东霞^{1,*}, 杨超¹, 江宝骅¹, 郭建军², 徐晓锋³

1 兰州大学西部环境教育部重点实验室/资源环境学院, 兰州 730000

2 中科院西北生态环境资源研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000

3 兰州大学管理学院, 兰州 730000

摘要:生态承载力是区域可持续发展的重要物质基础。为了探讨我国干旱区内陆河流域未来生态承载力的时空格局变化,以石羊河流域为研究区,基于该流域 1992、2002 年和 2012 年 3 期 Landsat TM 遥感影像,选取 10 个影响生态承载力变化的主要驱动因素,利用元胞自动机-马尔科夫模型(CA-Markov),以土地利用预测为切入点,对该流域 2022 年的生态承载力时空格局进行了模拟预测。首先基于 1992—2002 年数据预测了 2012 年石羊河流域土地利用状况,并与当年实际土地利用状况进行对比和验证,结果显示:Kappa 系数为 0.7956,说明本文所选用的预测方法预测结果可靠,可以用于该流域土地利用预测;其次,以 2012 年为起始年,模拟预测了 2022 年土地利用空间数据,并计算生态承载力时空格局,结果显示:2022 年石羊河流域单位面积生态承载力与 1992 年、2002 年和 2012 年相比整体空间分布格局变化不大,但区域内部变化却呈明显的空间分异特征;1992—2022 年流域生态承载力总量以 2002 年为拐点呈先减少后增加的趋势,其中建设用地的生态承载力增加最为显著;预测可知,较 2012 年,2022 年流域上游山区的林地、中游绿洲的建筑用地生态承载力均增加较快,且呈现较明显的斑块聚集,而中、下游绿洲区耕地、草地生态承载力增、减变化复杂,斑块分布较为离散和破碎;2012—2022 年土地利用类型将发生频繁转换,导致流域生态承载力结构组成变化较大,其中未利用地的转出对 2022 年流域生态承载力的增加贡献突出。研究结果表明自 2002 年以后,该流域实施的退耕还林还草、关井压田等生态工程已经并将继续对该流域生态效益的提高起到积极的作用。

关键词:石羊河流域;生态承载力;CA-Markov;预测;时空格局

Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River Basin on the basis of the CA-Markov model

YUE Dongxia^{1,*}, YANG Chao¹, JIANG Baohua¹, GUO Jianjun², XU Xiaofeng³

1 Key Laboratory of Western China's Environmental System, Ministry of Education, College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 School of Management, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The biocapacity is an important material foundation of regional sustainable development. In order to explore the spatio-temporal pattern of biocapacity in inland rivers, arid China in the future, for a case study of the Shiyang River Basin, using the CA-Markov model as a predication method and choosing 10 main driving factors influencing the biocapacity, we predicted the land use and assessed biocapacity in 2022 based on LandsatTM images in 1992, 2002, and

基金项目:国家自然科学基金(41671516);国家自然科学基金(41701623);中科院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金;甘肃省软科学专项(1504ZKCA090-1)

收稿日期:2017-11-30; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dxyue@lzu.edu.cn

2012. First of all, by comparing the predicted land use with the actual land use situation in 2012, we got the Kappa coefficient of 0.7956, which showed that the driving factors and the CA-Markov model were reliable for predicting the land use of the basin. Second, based on the model above, we predicted the land use condition and assessed biocapacity in 2022 with the year 2012 as a starting point. The results showed the following: in the Shiyang River Basin as a whole, the distribution pattern of biocapacity per unit area in 2022 will be similar to the situation in 1992, 2002, and 2012; however, there was remarkable spatial heterogeneity within the basin. The total biocapacity of the basin in 1992—2022 has been increasing since the turning point in 2002, and the increase of biocapacity in the built-up area was the most significant part of them. In the comparison with 2012, the biocapacity of the forestland in the mountainous area of the upstream reach and the built-up area in the oasis area of the midstream reach in 2022 should increase faster than other areas of the river basin, and there was a significant patch cohesion. Nonetheless, in the oasis areas of midstream and downstream reaches, the changes of farmland and grassland biocapacity should be complicated and the distribution of the land use patch should be discrete and fragmented. The frequent transition of land use types in 2012—2022 should lead to a large structural change of the biocapacity in the river basin, including an important contribution to the increase of biocapacity supported by the transfer-out area of unused land in 2022. Above all, the results provided a more extensive understanding of the spatio-temporal dynamic and spatial pattern of biocapacity in the Shiyang River Basin. Ecological engineering such as the Grain for Green Project will continue to produce obvious ecological benefits in the future.

Key Words: Shiyang River Basin; biocapacity; CA-Markov model; prediction; spatio-temporal pattern

生态承载力是人类赖以生存和发展的物质基础,决定着区域可持续发展的能力,对于人类社会和经济的发展至关重要^[1]。可持续发展现已成为理想的发展模式和世界各国普遍认同的政策目标^[2],因此生态承载力作为一个区域可持续发展能力评价的重要指标成为可持续发展研究的核心内容^[3-4]。

由 Rees 等^[5]提出并和 Wackernagel 等^[6]完善的生态足迹理论和方法,是目前被国内外广泛采用的生态承载力评价的理论和方法之一^[7]。在该方法中,生态承载力值的计算取决于土地利用/覆被面积和土地生产力两个基本因素,因此,区域土地利用/覆被的变化可直接引起生态承载力值的变化,也同时决定着生态承载力的空间格局的转变^[8]。基于此方法,近年来,利用遥感和 GIS 技术开展区域生态承载力历史以来的时空格局变化研究成果已较多。Niccolucci 等^[9]对世界各个国家和地区 1961—2007 年的生态承载力进行分析,认为生态承载力可能会被视作一种新的生态财富;岳东霞等^[10]从不同尺度对西北地区生态承载力的供给和需求做了定量计算和空间格局分析,研究结果表明西北地区的生态承载力具有空间异质性;汪玉琼等^[11]对石羊河上游山区生态承载力进行了时空格局动态分析,结果表明该地区生态承载力在时间尺度上缓慢增加,在空间尺度上具有明显的异质性;Yue 等^[12]以中国石羊河流域和泾河流域为典型流域,开展了基于多尺度栅格的流域生态承载力评价和空间格局模拟与对比,指出流域生态承载力具有较强的尺度依赖性,认为可塑性单元面积问题(modifiable areal unit problem, MAUP)可能造成区域甚至于全球生态承载力评价结论准确性不够,而进一步导致区域可持续发展状态判断有待商榷。同时,也有部分研究开展了区域生态承载力的预测研究,如 Yue 等^[13]利用马尔科夫模型预测了 2020—2050 年 4 个时间段泾河流域的总生态承载力以及 6 种不同类型土地的生态承载力,结果显示为总生态承载力持续增加,而各类型土地生态承载力呈现不同发展趋势。Guo 等开展了不同情景下的生态承载力“静态”优化分析,探究了生态承载力优化对生态赤字的影响作用及其所需的水资源成本^[2]。McBain 等通过长时间序列(70 年)生态承载力和生态足迹的变化分析,发现全球技术、经济和人口政策在很大程度上影响了生态承载力^[4]。但大多数研究仅限于时间尺度的趋势分析和预测,有关生态承载力空间格局预测模拟研究仍鲜见报道。

目前,国内外利用 CA-Markov 模型(又称时空马尔科夫链,spatial-temporal chain, STMC)开展土地利用时空格局预测模拟的应用研究较多。如,Arsanjani 等^[14]利用 CA-Markov 模型分析了德黑兰的城市化蔓延趋势

和土地类型的变化,研究结果显示 2016—2026 年间该区域的草地和空旷地大部分将会转为建筑用地。陈爱玲等^[15]运用 CA-Markov 模型模拟预测秦淮河流域土地利用变化,结果表明 2018 年研究区水田和不透水面分别减少 33.3% 和 31.1%。

鉴于此,本文以我国干旱区内陆河流域——石羊河流域为研究区,基于生态足迹方法、遥感数据和 GIS 技术,利用 CA-Markov 模型,以土地利用时空格局预测为切入点,开展区域生态承载力未来时空格局的预测模拟,即通过预测该流域土地利用/覆被变化,进而预测未来流域生态承载力的变化趋势,为流域开展生态环境保护、合理利用土地资源和制定可持续发展政策提供科学依据。

1 研究区概况

石羊河流域是我国西部干旱区典型的内陆河流域,位于甘肃省境内,地处黄土、青藏和蒙新三大高原的交汇过渡地带,横跨祁连山地、河西走廊、北山山地和阿拉善高原,地理坐标为 101°07′—104°16′E, 37°09′—39°19′N, 海拔高度在 1182—5202 m 之间,流域面积达 $4.27 \times 10^4 \text{ km}^2$, 气候垂直地带性明显,年平均降水量约在 60—610 mm 之间,年蒸发量在 1400—3040 mm 之间^[16]。石羊河流域自东向西主要由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等多条河流组成,全部发源于祁连山区(图 1)。河流补给主要来源于山区大气降水和高山冰雪融水,平均降水量达 450 mm,产流面积达 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,且降水 1/3 转化为地表径流。流域内水资源总量为 $16.61 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中地表水资源量 $15.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。石羊河流域植被的特征呈现出多样性^[17],按垂直地带性分为三个植被景观带:海拔在 2700—5000 m 之间的南部祁连山区,属于亚寒带针叶林与常绿杜鹃灌丛植被区域,自上而下逐渐呈现高山草甸、高山森林、灌木与草原;海拔在 1800—2700 m 的中低山丘陵地带,属于草原和荒漠化草原植被类型;海拔在 1300—1800 m 之间的中部走廊平原区与东部荒漠地区,主要呈现绿洲农业与荒漠植被景观。

石羊河流域是我国重要的生态屏障之一,也是我国干旱区内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一^[18]。20 世纪 90 年代后,国家加强了石羊河流域的水资源管理和生态环境综合治理,特别是 2000 年以后,以退耕还林还草、天然林资源保护、关井压田、压沙造林等生态工程的实施为主导的人类活动,对流域的生态承载力的恢复产生了巨大的影响。因此,开展该流域生态承载力的时空格局预测模拟,较为准确地了解未来一定时段该流域生态承载力趋势与格局,对于流域的可持续发展具有重要意义。

2 研究方法与计算

2.1 生态承载力计算模型

依照 Rees 和 Wackernagel^[5-6] 的生态足迹理论,生态承载力定义可表述为:研究区域内一定时期(通常为一年)具有全球平均生产力的所有可用的生物生产性土地和水域面积的总和,其计算模型如下:

$$BC = \sum_{i=1}^6 A_i \times YF_i \times EQF_i \quad (1)$$

式中, A_i 为区域第 i 类生物生产性土地面积; YF_i 为区域第 i 类生物生产性土地的产量因子,通常由区域该类土地的平均生产力与全球同类土地的平均生产力之间的比率而得,产量因子可以将该区域的某类生物生产性土地的生产力转换为具有全球可比性的生产力单位^[19]; EQF_i 为全球第 i 类生物生产性土地的均衡因子,通常是将全球该类生物生产性土地平均生产力除以全球所有类型生物生产性土地的平均生产力^[20]。该模型最终将不同类型的生物生产性土地转换为具有全球平均生产力的统一、可加和的生物物理指标,即全球公顷(gha)^[21]。

2.2 元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)模型

马尔科夫(Markov)模型是由原苏联数学家安德烈·马尔可夫首先提出而得名,它是基于马尔科夫随机

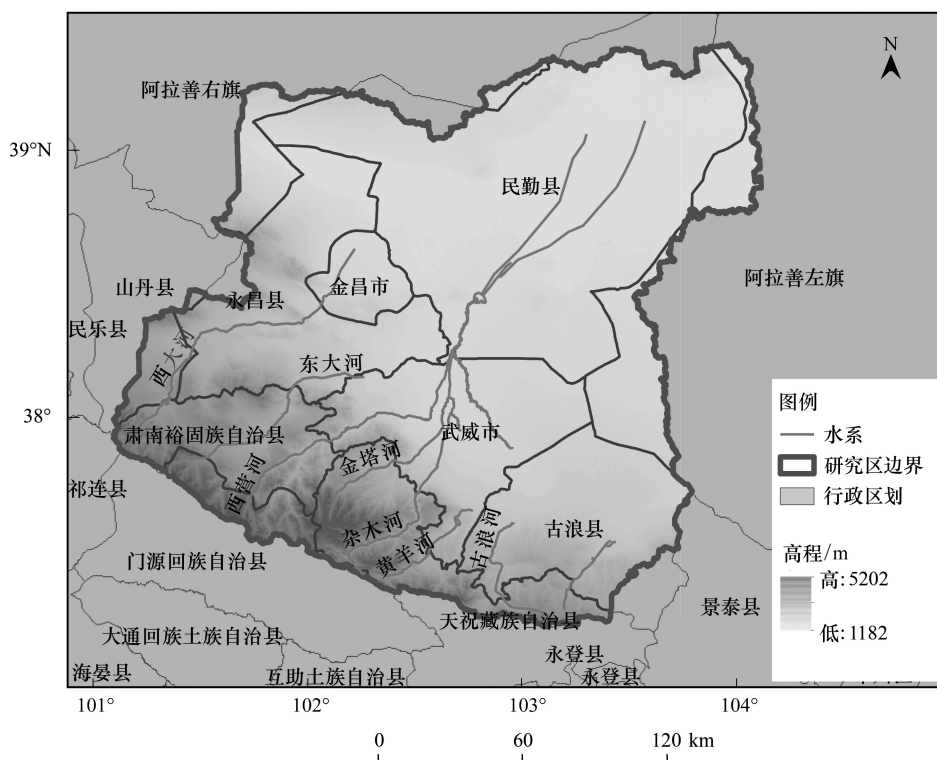


图1 研究区:石羊河流域图

Fig.1 The study area: Shiyang River Basin in Northwest China

过程系统而形成的一个过程理论模型,以达到预测和随机控制的目的^[22]。元胞自动机(CA)模型是一种时间、空间状态均离散的格子动力学模型,侧重于不同时空特征元胞的相互作用,具有强大的空间计算模拟能力,特别适合自组织功能系统的动态模拟和空间展示。在土地利用预测方面,马尔科夫模型侧重于对土地利用变化数量的预测,但无法进行空间表达,不能展现各类型土地变化的空间分布^[23]。而元胞自动机模型则能够对复杂空间系统的时空动态演化过程进行表达,能够弥补马尔科夫模型的不足。

CA-Markov 模型正是利用了 Markov 模型和 CA 模型的各自优势,将这两种模型,以及多准则、多目标的土地分配原则结合起来进行土地利用的预测方法,即通过将具有连续性质的空间分布元素加入到马尔科夫链的分析过程来实现土地利用预测模拟的。其工作原理是以预测基期(预测起始年)的土地利用为初始状态,以前一期土地利用转移面积和起始年多因素影响下的土地适宜性图集为依据,对土地利用类型进行重新分配,直至达到马尔科夫链预测的土地利用面积。可见,CA-Markov 模型同时具备对土地利用的时间动态和空间格局进行表达的优势,从而较好地模拟未来区域土地利用的时空格局,实现对区域土地利用的预测^[24-25],解决了土地利用时空同步模拟的瓶颈问题。

本文利用 IDRISI32 软件中的 CA-Markov 模块,基于 1992 年、2002 年和 2012 年 3 期土地利用的数据,首先以 2002 年为起始年,预测了石羊河流域 2012 年的生态承载力并与实际数据比较,以验证 CA-Markov 模型模拟的可靠性,进而以 2012 年为起始年预测 2022 年的土地利用空间数据,利用生态承载力模型计算 2022 年生态承载力并分析其时空格局变化。IDRISI 软件中参与处理的图像都为栅格数据,本文使用的土地栅格大小为 30 m×30 m。所有空间数据处理均在 ArcGIS 平台上完成。

根据 CA-Markov 模块的功能需求,模拟预测过程有以下几个关键点:(1)转换规则:本文利用 1992 年、2002 年和 2012 年 3 期土地利用空间数据,计算得到 1992—2002 年和 2002—2012 年的土地面积转移矩阵。以这两个时段的土地面积转移矩阵作为 CA-Markov 模块预测流域 2012 年和 2022 年的土地利用格局的转换规则。(2)土地利用变化的驱动因素遴选:土地利用变化的驱动因素主要包括自然与人文因素两大类因素。

在使用 CA-Markov 模型中,对于土地利用变化驱动因素的遴选和分析是极其重要的。借鉴前人研究结果^[26],本文选取了引起生态承载力变化的三类共 10 个主要影响因素作为驱动因素,包括海拔、坡度、坡向等地貌因素,积温(>10℃)、降水等气象因素,人口密度、人均 GDP 等经济因素,距河流最近、距道路最近、距居民点最近等距离因素,并将 2002 年和 2012 年各指标数据逐一空间化处理,获得各驱动因素的空间数据集,以构建流域土地利用适应性图集。(3)适宜性图集制作:适宜性指的是当前土地利用在下一个状态的适宜性,因此适应性图集就是各类土地利用在下一个状态的适宜性的图像集合。基于起始年各类土地的利用状况,利用 IDRISI 中的空间多元回归模型(logisticreg 模块),分别将每类土地利用类型作为因变量,10 个驱动因素作为自变量,通过回归分析,计算得到每类土地的空间分布概率图,再使用 collection editor 模块将所有的概率图集成一个文件中。本文根据起始年的 2002 年、2012 年土地利用和驱动因素空间分布状况,分别构建 2002 年和 2012 年的适宜性图集。(4)邻域滤波器及迭代次数:按照已有研究^[27],本文采用 5×5 摩尔邻域作为 CA-Markov 模型的滤波参数;模型运算 1 年为一个迭代周期,因此迭代次数设定为 10。基于以上土地利用预测结果,利用生态承载力模型,即可计算预测年的流域生态承载力空间数据集。

2.3 数据收集与处理

本文需要处理大量的基础数据,数据来源及处理方法具体如下。石羊河流域边界:系根据石羊河流域八大支流分布,依据研究区域数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model),利用 SWAT 水文模型计算得到。DEM 数据:来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。石羊河流域的行政区划边界:来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。石羊河流域土地利用空间数据:由美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)官网(<http://www.usgs.gov>)下载,获得石羊河流域 1992 年、2002 年、2012 年 3 期同时段的 Landsat TM 影像,空间分辨率为 30 m。在影像校正和增强处理的基础上,通过最优波段组合和人工目视解译,将土地利用类型分为六类:耕地、林地、草地、城乡工矿居民用地(建筑用地)、水域、未利用地,再经实地的勘正校准,得到了三年的土地利用现状矢量图。

石羊河流域自然和人文因素基础数据:2002 年、2012 年气象数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>),气象因素的空间数据集系利用流域内及周边的气象站点观测数据插值得到;道路、居民点数据来自中国西部环境与生态科学数据中心网站的石羊河流域基础数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn>);人文因素数据来自省地各级统计年鉴,空间数据系按照统计单元数据赋值于流域内行政区划的属性而生成;距离因素的空间数据集系在石羊河流域数据集基础上,利用 ArcGIS 的 near 工具分别计算点要素到最近居民点的点要素、河流线要素及道路线要素的欧式距离。以上因素的空间数据都是在 ArcGIS 10.2 软件中处理生成。由于气象数据、经济数据变动性大,故分别依据 2002 年、2012 年的相关观测和统计数据生成对应的空间分布图。

本文计算生态承载力时,1992 年、2002 年、2012 年和 2022 年产量因子和均衡因子采用的是已有文献公布的相近年份的中国平均产量因子和世界均衡因子^[28-32]。该流域的未利用地一般为戈壁沙漠,因生产力极低,故产量因子默认为 0^[13],其生态承载力也为 0,建筑用地因一般占用的是适宜耕种的优质土地,故产量因子和均衡因子默认与耕地相同^[33]。

2.4 CA-Markov 模型预测方法验证

在展开 2022 年石羊河流域土地利用预测模拟之前,为了检验 CA-Markov 模型预测各土地类型数量变化和空间分布的准确度,本文首先基于 1992、2002 年两期土地利用数据和 2002 年土地利用适应性图集,利用 CA-Markov 模型预测了 2012 年的土地利用时空格局。再用 2012 年预测数据与实测数据进行对比分析,来验证本文构建的 CA-Markov 模型预测方法的准确度。具体如下:

首先利用二期土地利用空间数据,获得 1992—2002 年土地面积转移矩阵,其次基于 2002 年 10 个自然和人文驱动因素基础数据和 2002 年的土地利用状况生成各类型土地的适宜性图集,假设 1992—2002 年土地转

移趋势与后十年基本相似,利用 CA-Markov 模块模拟得到 2012 年的土地利用的空间数据集,并形成空间分布预测图。

然后,使用 IDRISI 软件中 crosstab 模块,依据 Kappa 系数对比分析 2012 年石羊河流域土地利用空间分布的实际图和预测图的相似度,得到的 Kappa 系数为 0.7956(一般情况下,如果 Kappa 系数值不小于 0.75,则认为模拟的准确度高),说明基于本文所选驱动因素和所采用的实验方案取得的模拟结果精度较高、可靠,可用于进行该流域未来土地利用预测模拟。

3 结果与分析

3.1 基于 CA-Markov 的 2022 年土地利用状态预测模拟

由于石羊河流域 2012—2022 年将继续实施退耕还林还草等土地利用政策,基本延续过去 10 年(2002—2012 年)的土地利用趋向,因此,利用以上已通过验证的 CA-Markov 预测模拟方案,以 2012 年为起始年,基于 2002—2012 年的土地面积转移矩阵和 2012 年各类型土地的适宜性图集,在 ArcGIS 平台上,经过模拟计算得到了 2022 年石羊河流域土地利用空间数据集,并生成土地利用预测空间分布图(图 2)。

由图 2 中可知,2022 年石羊河流域土地利用空间格局由南到北,主要分为上游的林草区,中下游绿洲区及其周边大面积的荒漠区,景观格局呈明显的空间异质性,且层次较为明显。与 2002 年、2012 年土地利用状况比较,土地利用的整体空间分布格局基本一致,但其内部各类型土地则变化明显。

3.2 1992—2022 年生态承载力时空格局变化

基于 1992、2002、2012 年以及预测年 2022 年石羊河流域土地利用空间数据集,利用生态承载力计算模型,获得各年份基于土地斑块的单位面积生态承载力空间分布图(图 3)。

由图 3 可知,整体而言,1992—2022 年石羊河流域的单位面积生态承载力空间分布格局基本一致,由于流域土地利用和景观分布的空间异质性,上下游之间差异明显,呈现不均衡分布,其中,单位面积生态承载力高值区主要分布在该流域的中下游绿洲区,分布较为均衡,土地利用类型主要为耕地;其次为上游,依次为林地、草地、水域,斑块较为破碎,而未利用土地因的产量因子默认为 0,所以该区域单位面积生态承载力也为 0,主要位于流域中下游绿洲外围的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠区域,占地面积较大,分布最为均匀,凸显流域下游生态环境的严酷性,特别是民勤绿洲与周围的荒漠区域形成强烈的反差。

相比 1992 年、2002 年和 2012 年,预测年 2022 年单位面积生态承载力虽然大的空间格局没有明显变化,但部分区域的单位面积生态承载力分布却有很大变化。其中石羊河流域上游山区中部冰川周边高海拔区域的单位面积生态承载力由 1992 至 2022 年不断增高,到 2022 年时,高值区面积分布较 2012 年增加了 465.44 km²,而流域上游低值区面积分布较 2012 年减小 635.86 km²;中游绿洲区域其值比较稳定,除了西部的高值区少部分变为低值区外,其它区域没有明显的变化;下游的荒漠区域的单位面积生态承载力变化最少,但民勤绿洲内部单位面积生态承载力从 1992 年起开始逐渐减小,表明绿洲地区内部生态环境处于退化趋势。

图 4 显示,石羊河流域生态承载力总量呈现 1992—2002 年间的先减少、2002—2012 年间快速增加至

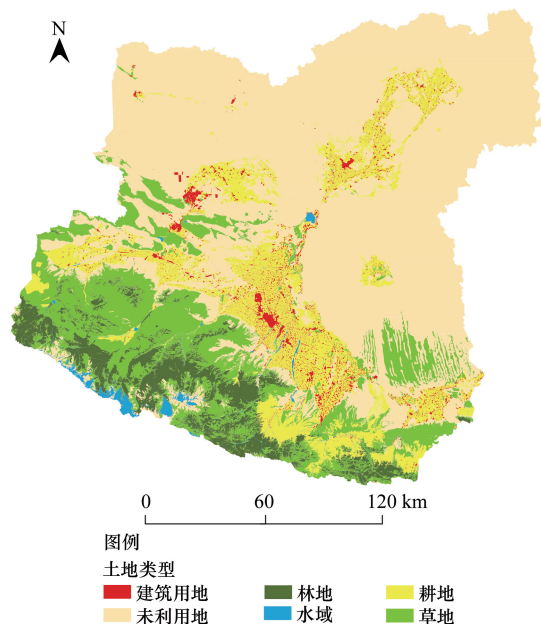


图 2 2022 年石羊河流域土地利用预测空间分布图

Fig.2 The spatial distribution of land use prediction in Shiyang River Basin in 2022

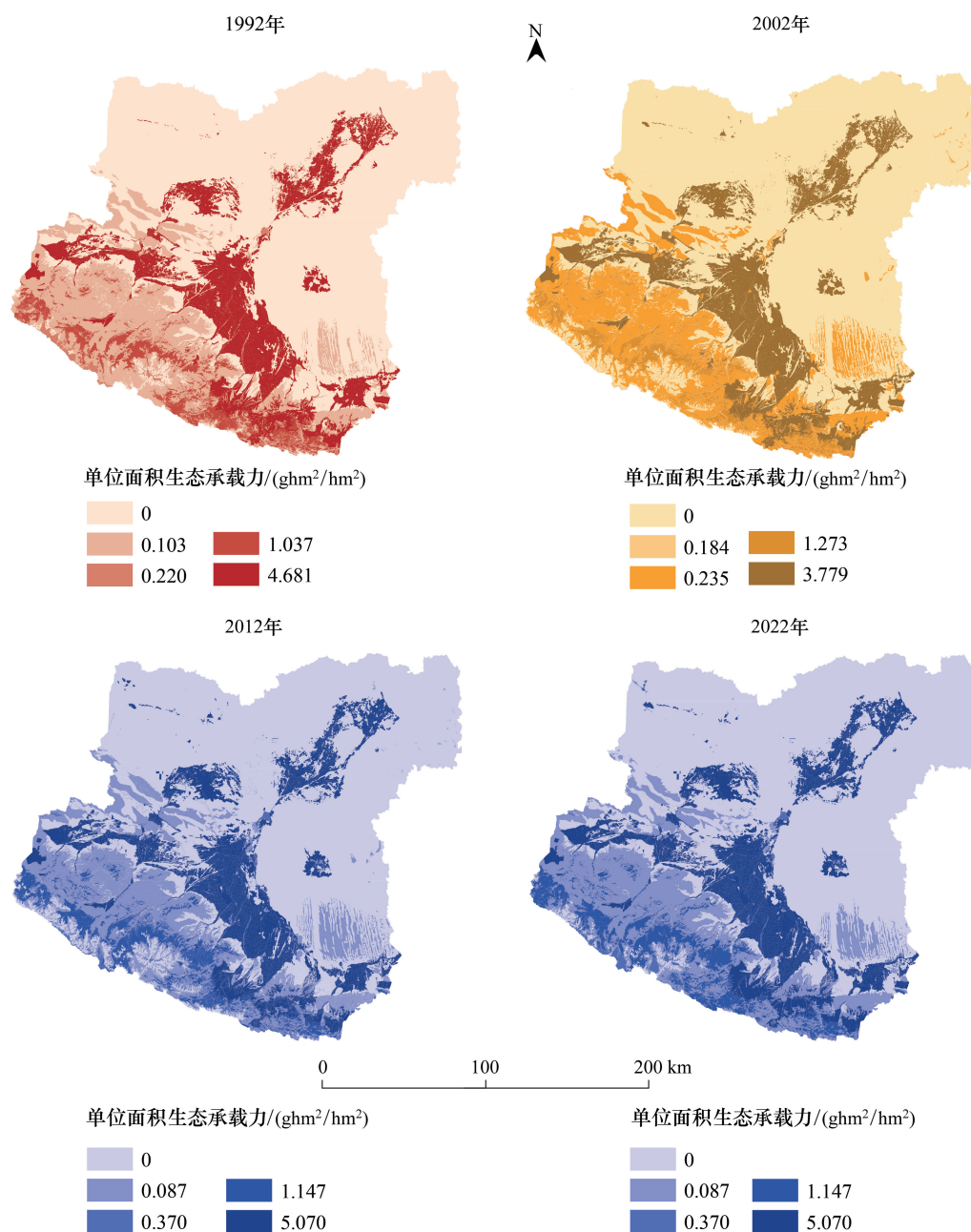


图 3 1992—2022 年单位面积生态承载力空间分布图

Fig.3 The spatial distribution of biocapacity per unit area of Shiyang River Basin in 1992—2022

2012—2022 年缓慢增加的趋势,而各类型土地生态承载力总量呈现不同的变化趋势,其中耕地、林地、水域、建筑用地的生态承载力总量变化均以 2002 年为拐点,呈先减小而后逐渐增加的趋势,但增加的幅度各有不同,尤以建筑用地生态承载力的增加幅度最大,这些变化与石羊河流域 2002 年以后全面实施退耕还林、关井压田等生态工程,以及中下游绿洲区城市化进程的加速发展密切相关。相反,草地生态承载力虽然也以 2002 年为拐点,但却呈现先增加而后快速减小的趋势,说明该流域自 2002 年以后草地资源的保护措施不甚理想。

进一步,在 ArcGIS 中使用 Intersect 工具进行空间叠置分析,首先分别将 2012、2022 年的土地利用转为 30 m (由于基础数据源于 Landsat 影像,分辨率为 30 m) 分辨率的栅格,栅格值表示单位面积生态承载力;然后在使用栅格计算器工具,用 2022 年的栅格图层减去 2012 年的栅格图层,得到差值图;差值图中大于 0 的值表示生态承载力增加,等于 0 的表示生态承载力不变,小于 0 的表示生态承载力减少;最终获得预测年 2022 年和

起始年 2012 年流域基于斑块的单位面积生态承载力差值,得到流域生态承载力变化的空间分布图(图 5)。结果显示,与 2012 年相比,2022 年该流域生态承载力增加的斑块主要分布在石羊河流域的上游祁连山高山区,且呈现较明显的斑块聚集,主要为林地恢复区,而较少分布在中下游绿洲区域,分布较为离散和破碎,为零散的新的土地开垦和植被修复区域;生态承载力减少的斑块主要分布在石羊河流域中游的金川-昌宁盆地和威武盆地,主要为大面积的撂荒地和荒漠化区域。

基于 2012 年和 2022 年的土地利用状况,在 ArcGIS 中使用 intersect 工具进行空间叠置分析,由土地利用转移矩阵得到石羊河流域 2012—2022 年各类土地的生态承载力转移矩阵(表 1 和表 2)。

由表 1 和表 2 显示,经预测,2012 年各类土地生态承载力向 2022 年的转移方向各不相同。因不同类型土地的生态生产力不同,故土地类型的转换将导致同一块土地转换前后的生态承载力发生变化,也将导致 2022 年流域生态承载力的内部结构组成有所变化。整体而言,除了没有变化的土地利用类型保持了原有生态承载力之外,2012 年生态承载力总转出量为 90366.99 gha,2022 年生态承载力总转入量为 198900.32 gha,整体将增加 108533.33 gha,是转出量的 1.20 倍。

其中,该流域 2012—2022 年期间耕地转向其他类型土地面积依次为建筑用地>未利用地>草地>水域>林地(表 1),生态承载力转出总量为 36603.51 gha,而转入总量仅为 15461.04 gha,转出量是转入量的 2.37 倍。因此,对耕地而言,因大量转向较耕地生态生产力低的土地类型,而导致 2022 年的生态承载力损失达 21142.47 gha,其主要原因是大量耕地转为未利用地致使生态承载力大量损失(表 2),占总损失量的 66.83%;林地主要转向未利用地和草地,建筑用地主要转向耕地、草地和未利用地,这 2 类土地也因部分土地转向较其生态生产力低的土地类型而导致生态承载力转出量大于转入量,使得 2022 年流域生态承载力也受到损失。

不同的是,该流域 2012—2022 年期间草地虽然也有一部分转为未利用地,但因其大部分转向生态生产力较高的林地、建筑用地、耕地,而最终使得生态承载力转入量大于转出量,致使 2022 年的生态承载力增加了 32923.30 gha;其次,水域转出面积虽然较少,但主要转向为生态承载力较大的其他类型土地,也使得 2022 年的生态承载力有所增加。

特别是,该流域 2012—2022 年期间未利用地的一部分将转向其他土地利用类型,转移土地面积依次为建筑用地>林地>耕地>草地>水域,因转出后的土地类型生态生产力均大于未利用地,使得 2022 年生态承载力将净增加 120035.41 gha。

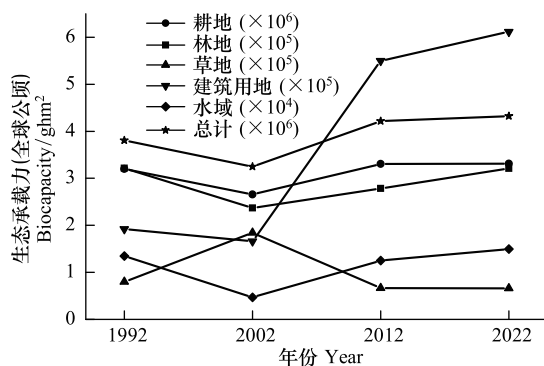


图 4 1992—2022 年各类土地总生态承载力变化趋势

Fig. 4 The development trend of total biocapacity of different land use types in 1992—2022

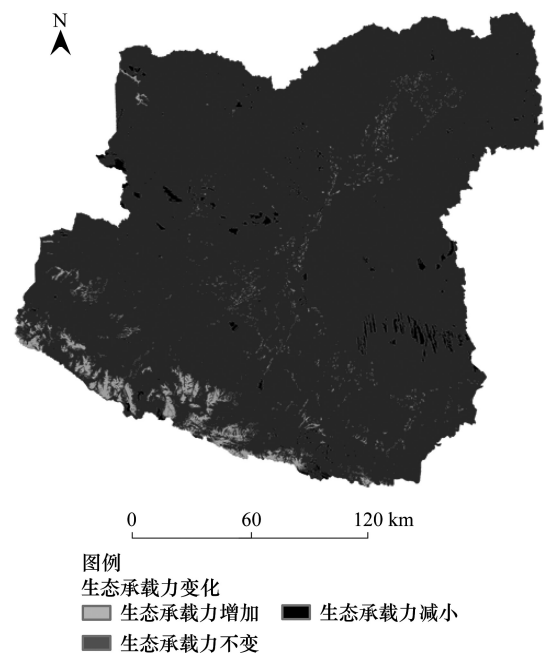


图 5 2012—2022 年石羊河流域生态承载力变化斑块空间分布图

Fig. 5 The spatial distribution of biocapacity change patch in Shiyang River Basin between 2012 and 2022

表 1 2012—2022 年石羊河流域土地利用转移矩阵

Table 1 The land use transfer matrix of Shiyang River Basin between 2012 and 2022

土地利用类型 land use type		2022 年					
		耕地 Farmland/ha	林地 Forestland/ha	草地 Grassland/ha	建筑用地 Built-up area/ha	水域 Water area/ha	未利用 Unused land/ha
2012 年	耕地 Farmland /ha	645062.10	133.67	817.20	2967.56	514.10	2786.81
	林地 Forestland/ha	133.78	227461.02	3374.55	171.35	159.37	11407.99
	草地 Grassland/ha	713.78	24587.73	710346.62	969.00	2280.07	24591.73
	建筑用地 Built-up area /ha	3481.84	97.56	1516.41	102678.60	151.73	562.05
	水域 Water area/ha	281.18	1400.20	1854.45	549.80	27947.43	1808.50
	未利用地 Unused land/ha	3169.87	26075.58	34458.64	13330.08	9371.39	2383362.18

表 2 2012—2022 年石羊河流域生态承载力转移矩阵

Table 2 Biocapacity transfer matrix of Shiyang River Basin between 2012 and 2022

土地利用类型 Land use type		2022 年						
		耕地 Farmland/gha	林地 Forestland/gha	草地 Grassland/gha	建筑用地 Built-up area/gha	水域 Water area/ gha	未利用地 Unused land/gha	转出、入量合计 Total transfer-out and transfer-in
2012 年	耕地 Farmland/gha	3270593.84 *	(677.76) 153.27	(4143.38) 71.42	(15046.13) 15046.13	(2606.57) 190.22	(14129.67) 0	(36603.51) 15461.04
	林地 Forestland/gha	(153.40) 678.32	260806.80 *	(3869.26) 294.94	(196.47) 868.80	(182.74) 58.97	(13080.41) 0	(17482.28) 1901.03
	草地 Grassland/gha	(62.38) 3619.00	(2148.97) 28192.30	62084.29 *	(84.69) 4913.02	(199.28) 843.62	(2149.32) 0	(4644.64) 37567.94
	建筑用地 Built-up area/gha	(17653.62) 17653.62	(494.63) 111.86	(7688.48) 132.53	520601.02 *	(769.29) 56.14	(2849.73) 0	(29455.79) 17954.15
	水域 Water area/gha	(104.03) 1425.61	(518.07) 1605.47	(686.15) 162.08	(203.43) 2787.60	10340.55 *	(669.15) 0	(2180.83) 5980.76
	未利用地 Unused land/gha	(0) 16071.89	(0) 29898.27	(0) 3011.68	(0) 67586.16	(0) 3467.41	0 *	(0) 120035.41

各类型土地生态承载力转换数值可表达为:括号()内的数值为 2012 年土地转出前的生态承载力,括号()外的数值为土地转出后的生态承载力,即 2022 年转入为新类型土地的生态承载力。* 表示未转换的同类土地生态承载力保持量

综上所述,由于该流域将继续实施退耕还林还草、关井压田等生态工程和土地利用流转政策,使得该流域在保证整体生态环境持续稳定的前提下,生态环境的好转将是必然的。而其中,未利用地与其他土地类型利用的相互转换在石羊河流域生态承载力数量和结构变化中具有重要的地位,因此,在水资源有限的干旱区内陆河流域,对未利用地的合理利用是提高流域未来生态承载力关键。

以上结果是基于 2022 年生态承载力产量因子和均衡因子均维持 2012 年现状的假设而得到的。未来随着农、林、牧、渔业科技发展,各类型土地生态生产力必然会不断增加,因此本文计算结果仅为保守的预测结果。

4 结论

石羊河流域由于地形、地貌、气候以及水资源等环境因素的影响,土地利用空间分布极不均匀,特别是,近年来受气候变化与人类活动的深入影响,整个流域基于土地斑块的生态承载力呈现特殊的时、空变化趋势。

本文采用 CA-Markov 模型,基于遥感数据、GIS 空间分析技术,以 2012 年为起始年,在对石羊河流域 2022 年土地利用状态预测基础上,预测了 2022 年流域基于斑块尺度的生态承载力空间数据,并对比分析了 1992—2022 年该流域不同时间段的生态承载力的时空变化及内部结构转换趋势,实现了对该流域近 30 年生态承载力的时空格局模拟分析。结果显示,时间尺度上,以 2002 年为拐点,1992—2022 年间该流域生态承载力总量呈先减少后增加的变化趋势,其中建筑用地生态承载力增加趋势最为显著;空间上,1992—2022 年间

流域单位面积生态承载力空间格局整体变化不大,但其内部不同区域的单位面积生态承载力呈不同的变化趋势。其中,与起始年 2012 年相比,2022 年流域上游山区的林地、中游绿洲的建筑用地生态承载力均增加较快,且呈现较明显的斑块聚集,而中、下游绿洲区耕地、草地生态承载力的增减变化复杂,斑块分布较为离散和破碎,生态承载力减少的斑块主要分布在石羊河流域中游的金川-昌宁盆地和威武盆地,主要为大面积的撂荒地和荒漠化区域。水域生态承载力整体变化不明显;预测可知,2012—2022 年土地利用类型将发生频繁转换,导致流域生态承载力结构组成变化较大,其中未利用地的转出对未来全流域以及各类土地生态承载力的增加贡献突出。综上,该流域生态承载力时空变化态势与当地实施的退耕还林、关井压田等生态工程,严格的农田水资源管理政策,以及这一期间流域的城市化速度较快相吻合,说明我国实施的生态保护政策已取得并将继续取得更好的生态效益。本文有关石羊河流域未来生态承载力的时、空间格局和结构变化的预测结果对该流域制定未来生态环境保护和管理工作具有重要的现实指导意义和应用价值。

本文在充分考虑了模拟时段内自然和人文驱动因素对土地利用的影响和作用的基础上,利用 CA-Markov 模型开展了流域生态承载力时空格局预测,并验证了该模型的可靠性,展示了 CA-Markov 模型在预测大尺度区域生态承载力方面的优势,这对仅在时间尺度上开展生态承载力预测的已有研究是一个较大改进。但是,由于本文系基于土地利用政策基本不变的假设条件下开展模拟预测的,土地利用的自然与人文驱动因素也是基于已有的研究成果和经验进行选择的,没有对假设条件和各因素的影响程度大小做出深入、定量的分析,预测结果必然存在一定的误差。其次,本文计算生态承载力所采用的产量因子和均衡因子是已有文献公布的相近年份的中国平均产量因子和世界均衡因子,计算结果与研究区的实际情况相比也存在一定的误差。以上不足还有待开展进一步的深入研究和改进,以提高研究区生态承载力预测的准确度。

参考文献 (References):

- [1] Arrow K, Bolin B, Costanza R, Dasgupta P, Folke C, Holling C S, Jansson B O, Levin S, Mäler K G, Perrings C, Pimentel D. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 1995, 268(5210): 520-521.
- [2] Guo J J, Yue D X, Li K, Hui C. Biocapacity optimization in regional planning. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41150.
- [3] Rudolph A, Figge L. Determinants of ecological footprints; what is the role of globalization? *Ecological Indicators*, 2017, 81: 348-361.
- [4] McBain B, Lenzen M, Wackernagel M, Albrecht G. How long can global ecological overshoot last? *Global and Planetary Change*, 2017, 155: 13-19.
- [5] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [6] Rees W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: measuring the natural capital requirements of the human economy. *Focus*, 1996, 6(1): 45-60.
- [7] Yang Y, Hu D. Natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: a case study in northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 178-188.
- [8] 岳东霞, 杜军, 刘俊艳, 郭建军, 张佳静, 马金辉. 基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价. *生态学报*, 2011, 31(9): 2550-2558.
- [9] Niccolucci V, Tiezzi E, Pulselli F M, Capineri C. Biocapacity vs Ecological Footprint of world regions: a geopolitical interpretation. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 23-30.
- [10] 岳东霞, 马金辉, 巩杰, 熊友才, 宋雅杰. 中国西北地区基于 GIS 的生态承载力定量评价与空间格局. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(6): 68-75.
- [11] 汪玉琼, 郭建军, 李凯, 张佳静, 杜军, 岳东霞. 石羊河流域上游山区生态承载力时空格局动态评价. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(2): 166-172.
- [12] Yue D X, Guo J J, Hui C. Scale dependency of biocapacity and the fallacy of unsustainable development. *Journal of Environmental Management*, 2013, 126: 13-19.
- [13] Yue D X, Ma J H, Guo J J, Zhang J J, Du J, Song Y J, Hui C. RS & GIS-based spatiotemporal analysis of ecological footprint and biocapacity pattern of Jinghe River watershed in China: does supply meet demand? *Advanced Materials Research*, 2012, 356-360: 2820-2832.
- [14] Arsanjani J J, Kainz W, Mousivand A J. Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov Chain based on cellular automata: the

- case of Tehran. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2011, 2(4): 329-345.
- [15] 陈爱玲, 都金康. 基于 CA-Markov 模型的秦淮河流域土地覆盖格局模拟预测. *国土资源遥感*, 2014, 26(2): 184-189.
- [16] Shi J A, Wang Q, Chen G J, Wang G Y, Zhang Z N. Isotopic geochemistry of the groundwater system in arid and semiarid areas and its significance: a case study in Shiyang River basin, Gansu province, northwest China. *Environmental Geology*, 2001, 40(4/5): 557-565.
- [17] 韩兰英, 王宝鉴, 张正偲, 万信, 杨永顺. 基于 RS 的石羊河流域植被覆盖度动态监测. *草业科学*, 2008, 25(2): 11-15.
- [18] 马国军, 刘君娣, 林栋, 陈年来. 石羊河流域水资源利用现状及生态环境效应. *中国沙漠*, 2008, 28(3): 592-597.
- [19] 赵永华, 贾夏, 王晓峰. 泾河流域土地利用及其生态系统服务变化. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(4): 79-85.
- [20] Bastianoni S, Niccolucci V, Pulselli R M, Marchettini N. Indicator and *indicandum*: “Sustainable way” vs “prevailing conditions” in the Ecological Footprint. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 47-50.
- [21] Wiedmann T, Minx J, Barrett J, Wackernagel M. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics*, 2006, 56(1): 28-48.
- [22] 姜广辉, 张凤荣, 秦静, 张琳, 宫攀. 北京山区农村居民点分布变化及其与环境的关系. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 85-92.
- [23] Wickramasuriya R C, Bregt A K, Van Delden H, Hagen-Zanker A. The dynamics of shifting cultivation captured in an extended Constrained Cellular Automata land use model. *Ecological Modelling*, 2009, 220(18): 2302-2309.
- [24] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81-87.
- [25] Han J, Hayashi Y, Cao X, Imura H. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: a case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 91(3): 133-141.
- [26] 郭建军. 流域生态承载力空间尺度效应与优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [27] 赵冠伟, 陈颖彪, 陈健飞, 李江涛. CA-Markov 模型的空间尺度敏感性研究. *地理科学*, 2011, 31(8): 897-902.
- [28] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [29] WWF. Living Planet Report 2006. Gland, Switzerland: WWF International, 2006.
- [30] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [31] Ewing B, Reed A, Galli A, Kitzes J, Wackernagel M. Calculation Methodology for the National Footprint Accounts. Oakland: Global Footprint Network, 2010.
- [32] 张桂宾, 王安周. 中国中部六省生态足迹实证分析. *生态环境*, 2007, 16(2): 598-601.
- [33] WWF. Living Planet Report 2002. Gland, Switzerland: WWF International, 2002.