

基于水资源承载力的黑河中游 生态建设空间格局优化

蒙古军[†] 周朕 郭力仁

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; [†] E-mail: jijunm@pku.edu.cn

摘要 以黑河中游为研究区, 基于系统动力学模型、灰色线性规划模型和 Dyna-CLUES 模型, 在揭示区域水资源承载力的基础上进行景观结构优化, 并通过耕地、林地和草地分布概率的博弈, 进行退耕还林区、退耕还草区和人工造林区的空间位置识别, 得到如下结果。到2020年, 在水资源满足生产发展、生活保障和生态优化的情景下, 黑河中游水资源可承载人口为144.16万, 可承载工业增加值为79.73亿元, 可承载耕地、林地和草地面积分别为3027.88, 953.535 和3947.115 km²。以水资源承载能力为基本约束, 黑河中游景观最优结构为耕地2742.49 km², 林地846.456 km², 草地2184.57 km², 水域170.671 km², 建设用地364.509 km², 未利用地13289.23 km²。生态建设空间分布格局较分散, 退耕还林区集中在高台、临泽和甘州绿洲边缘, 以期增强绿洲抵御风沙功能; 退耕还草区集中在山丹和肃南的海拔较高、坡度较大、水资源和耕作条件均较差的区域, 以期减轻区域水资源压力; 人工造林区集中在民乐和山丹两县的耕地外围, 以地势平坦、水资源条件相对较好的未利用地为主, 以期增强区域水源涵养、水土保持和防风固沙等功能。

关键词 水资源承载力; 景观格局; 生态建设; 黑河中游

Grain for the Green Spatial Pattern Optimization in the Middle Reaches of Heihe River Based on Water Carrying Capacity

MENG Jijun[†], ZHOU Zhen, KUO Lijen

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), School of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] E-mail: jijunm@pku.edu.cn

Abstract This paper takes the middle reaches of Heihe River as the study area, where has the most concentrated oasis in Northwest China with fragile ecological environment and huge conflict between water supply and demand. The water carrying capacity was analyzed based on SD model. Then, the land use quantity structure optimization was carried out by grey linear planning model under the constraint of water resource carrying capacity. Next, the probability of cultivated land, forest and grass land was calculated by the space optimization module of Dyna-CLUES model, and the optimized spatial pattern were identified through probability game. The results show that when the balance between the supply and demand of water resources is achieved in 2020, the research area can support 1.44 million people, 7.973 billion industrial added values, separately the forests, grass land and cultivated land that the research area can support is 953.535 km², 3947.115 km² and 3027.88 km². The best landscape quantity structure include 2742.49 km² cultivated land, 846.456 km² forest, 2184.57 km² grass land, 170.671 km² water area, 364.509 km² construction land and 13289.23 km² unutilized land. The implementation of returning cropland to forests can enhance the ability of oasis areas to resist hazards caused by wind and sand, mainly in Gaotai, Linze and Ganzhou. The locations of returning cropland to grassland focus in Shandan and Sunan with high altitude, steep slope and poor water, which have poor soil condition and is inappropriate for forest. Forest plantation locations focus in the periphery of cropland in Minle and Shandan, and those areas mainly are flat unused land with

good water resource conditions, which are of great significance for water and soil conservation, wind prevention and sand fixation.

Key words water carrying capacity; landscape pattern; ecological construction; middle reaches of Heihe river

在干旱区内陆河流域,水资源是制约区域社会经济发展和生态建设的“瓶颈”,更是影响生态安全的焦点和枢纽^[1]。由于干旱区绿洲水资源短缺,土地利用活动常挤占生态环境用水,导致部分区域水资源开发利用严重超过最大极限,引发一系列生态环境问题,如地表水域萎缩、地下水位下降、泉水量衰减、水质污染与盐化、天然植被退化、土地荒漠化和盐渍化、沙尘暴等^[2]。为保障干旱区生态安全,在有限水资源合理利用和满足社会经济发展诉求的前提下,基于生态系统管理的区域性特点^[3],进行自然生态恢复和人工生态建设,构建持续、高效的人类-环境耦合系统适应模式成为关键^[4]。

区域水资源承载力指在一定的经济社会和科技水平条件下,区域水资源系统能够支撑生态环境和社会经济可持续发展的合理规模。区域水资源承载力关注社会经济与资源环境的协同发展,强调可持续性^[5-6],对区域社会经济发展的合理规模提出阈值^[7],具有动态性、多目标性和极限性等特点。近年来,区域水资源承载力的研究方法由过去的单一指标和静态分析发展到集分析、评价与预测为一体^[8]的系统多目标和动态综合分析,出现常规趋势法^[9]、综合评价法^[10]、多目标分析法^[11]以及系统动力学法^[12]等研究方法。景观格局优化通过合理的数量安排和空间布局,实现土地利用的可持续性,长期以来一直是地理学关注的重要内容。从1969年McHarg^[13]提出“筛网法”至今,分析的方法及手段有了长足的发展。20世纪80年代后,陆续出现形态法、图形叠置法、数学组合法、因子分析法和逻辑组合法等^[14-15]。尤其是随着景观生态规划研究的深入,出现很多景观格局优化的方法,如景观生态规划方法^[16-18]、景观生态安全格局判定方法^[19]、景观生态模型方法^[20]、公众参与的规划方法^[21]和情景预案研究方法^[19,22-23]等。目前,通过数量结构优化和空间布局优化,实现区域土地资源可持续利用^[24-25],尤其是数理模型^[26]、动力学模型^[27]、CLUE-S模型^[28]和启发式算法^[29]等方法得到普遍应用。

黑河是中国西北第二大内陆河,流域内的人类活动集中在中游地区。近年来,随着人口数量的增长和社会经济的快速发展,黑河中游的水资源危机

日益凸显。特别是2000年甘蒙分水计划实施以来,中游缺水的状况进一步加剧,人均占有可利用水资源量 1250 m^3 ,亩均 327 m^3 ,仅为全国水平的57%和18.7%,是典型的资源型缺水地区。此外,黑河中游地区还有 $68.3\times 10^3\text{ km}^2$ 潜在可开发荒地^[30],对下游地区来说是威胁水资源安全的最大隐患,随着城市化进程加快,水土资源矛盾将更加尖锐。近年来,退耕还林(草)是黑河中游实施的重要生态建设工程,将不适宜耕种的土地有计划地退耕为林地和草地,增加区域生态用地面积以改善生态环境质量。本研究基于区域水资源生产、生活和生态需求,分析水资源承载能力,并以此为约束条件,进行生态建设格局优化,为干旱区内陆河流域土地资源的可持续利用和生态系统管理提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

黑河从芨落峡至正义峡之间为中游,地处古丝绸之路咽喉处的河西走廊中段,包括甘肃省张掖市的山丹、民乐、甘州、临泽和高台等区县,总面积为 $1.96\times 10^4\text{ km}^2$ (图1)。受地形和气候影响,从南部祁连山麓到北部走廊平原,划分为山地草甸草地、山前荒漠草原草地、农业用地(包括耕地、人工林

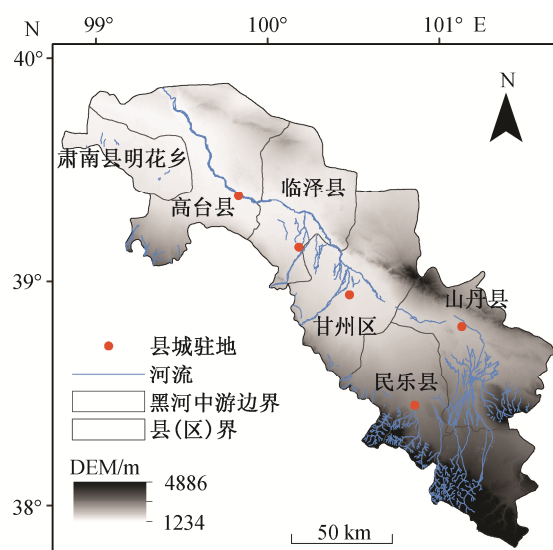


图1 研究区示意图

Fig. 1 Geographical location and terrain of the study area

地和园地)、平原区沼泽草甸草地(包括林灌草地)以及戈壁和沙地等景观类型^[31]。黑河中游是黑河流域人类活动最密集、绿洲最集中、经济最发达的地区。人口122.43万(2017),占全流域人口的65.7%;农作物播种面积以及粮食产量均占全流域的70%以上^[32]。黑河中游还是全流域主要耗水区和水资源调控关键区^[33],其社会经济用水总量占全流域的84.7%^[30],承担保障下游生活、生产和生态用水供给的责任。

1.2 数据来源

本文土地利用数据以2014年的Landsat OLI影像为基础,利用ENVI 4.7,通过人机交互式目视解译获得,空间分辨率为30 m×30 m,解译精度达到88.76%。基础地理信息数据(包括行政区划、道路、水系、居民点和灌渠等)来自中国科学院寒区旱区科学数据中心的《数字黑河》项目(<http://westdc.westgis.ac.cn/heihe/>);1951—2013年的气温降水数据亦由该数据中心提供;地下水监测数据来源于张掖盆地1986—2004年的逐日观测资料;土壤数据来源于FAO基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。DEM数据由美国马里兰大学全球土地覆被数据提供,分辨率为30 m×30 m;植被覆盖度(2006—2011年)来自Goddard Space Flight Center的MODIS影像数据。社会经济统计数据和水资源数据来自《张掖统计年鉴》(2006—2014年)。相关规划和政策等信息来自张掖市国土局、规划局以及张掖市人民政府门户网站(<http://www.zhangye.gov.cn/Index.html>)。

1.3 研究方法

1.3.1 水资源承载力评价

区域水资源系统具有动态性、多层次、开放性和非线性等特点,各部分之间具有关联性、反馈效应。水资源利用需兼顾经济、社会和环境等众多效益目标。系统动力学(SD)的系统性思想和动态反馈机制能较好地表达区域水资源系统的复杂性^[34],因此,本研究采用SD模型来进行水资源承载力评价。

以黑河中游为空间边界,模拟年限为2006—2020年。以2006年为模拟基准年,模拟步长为1年。基于Vensim PLE x32软件建立包括5个子系统(水资源供给子系统、农业用水子系统、工业用水子系统、生活用水子系统和生态用水子系统)、5个状态变量和9个表函数的水资源承载力SD模型(图2)。

1) 水资源供给子系统。黑河中游水资源主要通过上游来水、降水和地下水补给。可利用水资源总量计算公式为:可利用水资源总量=上游来水+降水+地下水-下游分水。

2) 生活用水子系统。包括城镇人口系统和农村人口系统两部分。状态变量为总人口,速率变量为人口增长速度,主要的决策变量有人口自然增长率、城市化率、城市生活用水定额和农村生活用水定额,反馈关系(“+”为正反馈,“-”为负反馈,下同)如下:

总人口→+城市人口→+城市生活需水量→+生活需水量→+总需水量→+供需差额→+缺水程度→-人口增长速度→-总人口,

总人口→+农村人口→+农村生活需水量→+生活需水量→+总需水量→+供需差额→+缺水程度→-人口增长速度→-总人口。

3) 农业用水子系统。状态变量为耕地面积,速率变量为耕地面积增长速度,主要的决策变量包括耕地面积增长速率和灌溉定额,反馈关系为:耕地面积→+农业需水量→+总需水量→+供需差额→+缺水程度→-耕地面积增长速度→-耕地面积。

4) 工业用水子系统。状态变量为工业增加值,速率变量为工业增加值增长速度,主要的决策变量包括工业增加值增长速率和万元工业增加值增长速度,反馈关系为:工业增加值→+工业需水量→+总需水量→+供需差额→+缺水程度→-工业增加值增长速度→-工业增加值。

5) 生态用水子系统。干旱区水资源优化配置的核心问题是确定生态需水量。传统的生态需水量计算包括河道内生态需水量的估算和河道外生态需水量的估算,由于“九七”分水方案的实施,保证了黑河下游不会断流,确保河流最基本的生态环境功能的发挥,因此本研究中的生态用水子系统只考虑河道外植被生态需水量的估算。本文基于Penman-Monteith公式计算潜在蒸散量,结合植被归一化指数(NDVI)以及降水量反映区域生态需水量。

状态变量为草地面积与林地面积,速率变量为林地面积增长速度与草地面积增长速度,主要决策变量包括林地单位生态需水量、草地单位生态需水量、林地面积增长速率、草地面积增长速率,其反馈关系如下:

林地面积→+林地生态需水量→+生态需水量→+总需水量→+供需差额→+缺水程度→-林地面积增速

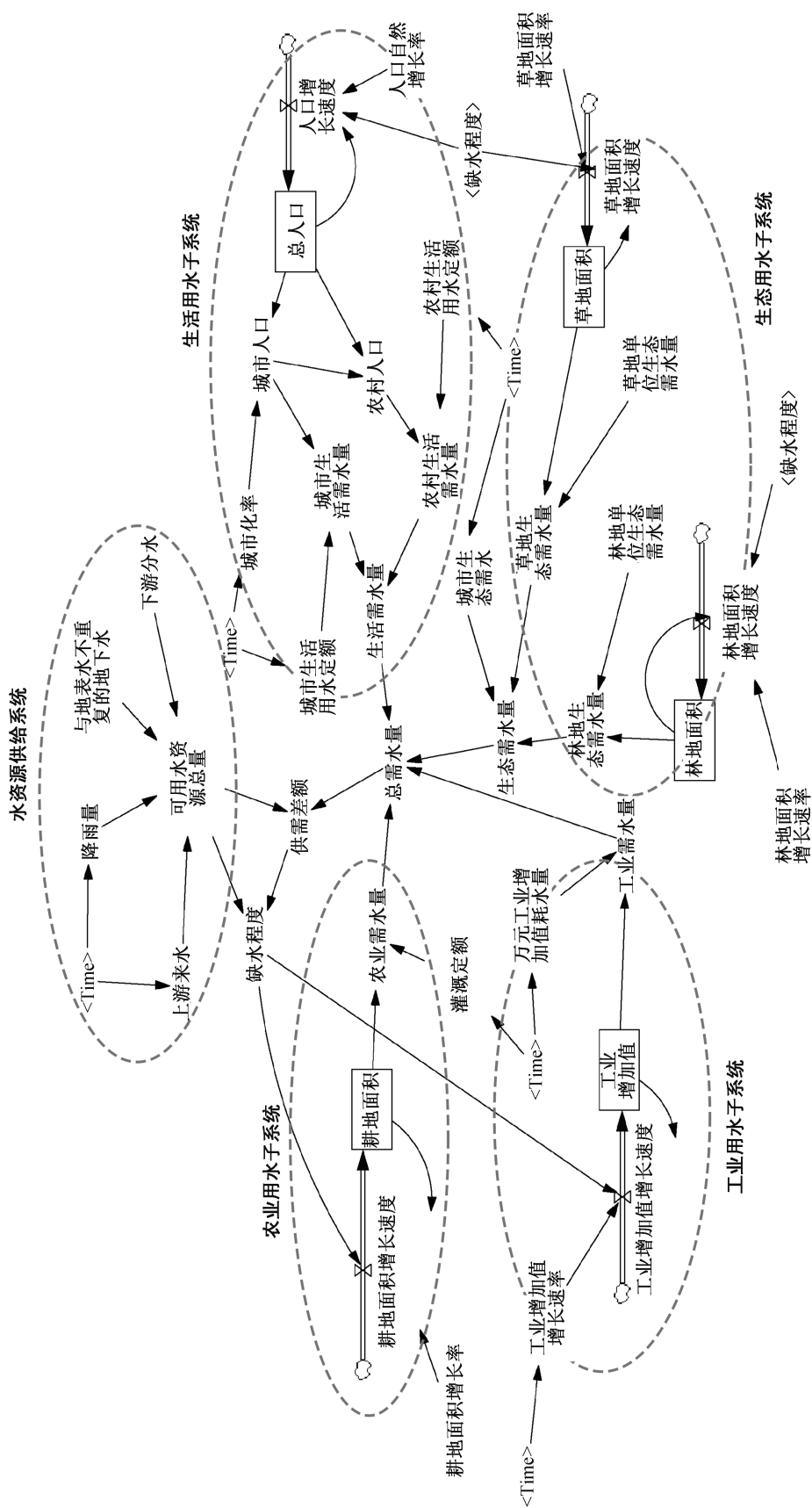


图 2 黑河中游水资源承载力 SD 模型
Fig. 2 SD model of the middle reaches of Heihe River Basin

→-林地面积,
草地面积→+草地生态需水量→+生态需水量→+总
需水量→+供需差额→+缺水程度→-草地面积增速
→-草地面积。

分析反馈关系图和各个子系统变量间的逻辑关
系,构建状态方程、速率方程、辅助方程和表函数
(表 1)。

基于 2006—2011 年数据,模拟 2012—2014 年

表 1 黑河中游水资源承载力系统 SD 方程式

Table 1 SD equation of water resource capacity system in the middle reaches of Heihe River Basin

代号	含义	单位	类型	方程式
RWQ	上游来水	亿 m ³	T	$RWQ.K=TABLE(Time)$
UWQ	与地表水不重复的地下水量	亿 m ³	C	$UWQ.K=Const$
PWQ	降水量	亿 m ³	T	$PWQ.K=TABLE(Time)$
DWQ	下游分水	亿 m ³	C	$DWQ.K=Const$
WSQ	可用水资源总量	亿 m ³	A	$WSQ.K=RWQ.K+PWQ.K+UWQ.K-DWQ.K$
TW	总需水量	亿 m ³	A	$TW.K=LW.K+IW.K+AW.K+EW.K$
BPN	供需差额	亿 m ³	A	$BPN.K=TW.K-WSQ.K$
WSD	缺水程度	无量纲	A	$WSD.K=BPN.K/WSQ.K$
PGR	人口自然增长率	无量纲	C	$NGR.K=Const$
PG	人口增长速度	人/年	R	$PG.kl=TP.K \times PGR.K \times (1-1.5 \times WSD \times 0.01)$
TP	总人口	人	L	$TP.K=TP.J+PG.K \times DT$
UR	城市化率	无量纲	T	$UR.K=TABLE(Time)$
UP	城市人口	人	A	$UP.K=UR.K \times TP.K$
RP	农村人口	人	A	$RP.k=TP.K-UP.K$
ULS	城市生活用水定额	L/(人·天)	T	$ULS.K=TABLE(Time)$
RLS	农村生活用水定额	L/(人·天)	T	$RLS.K=TABLE(Time)$
ULW	城市生活需水量	L	A	$ULW.K=RLS.K \times UP.K$
RLW	农村生活需水量	L	A	$RLW.K=RLS.K \times RP.k$
LW	生活需水量	亿 m ³	A	$LW.K=(RLW.K+ULW.K) \times 10^{-12}$
IGR	工业增加值增长速率	无量纲	A	$IGR.k=TABLE(Time)$
IG	工业增加值增长速度	万元/年	R	$IG.K=IV.K \times IGR.k \times (1-1.5 \times WSD \times 0.01)$
IV	工业增加值	万元/年	L	$IV.K=IV.J+IG.K \times DT$
IVW	万元工业增加值耗水	m ³ /万元	A	$IVW.K=TABLE(Time)$
IW	工业需水量	亿 m ³	A	$IW.K=IV.K \times IVW.K \times 10^{-8}$
CGR	耕地面积增长率	万亩	A	$CGR.K=Const$
CG	耕地面积增长速度	无量纲	R	$CG.KL=CA.K \times CGR.K \times (1-2 \times WSD.K \times 0.01)$
CA	耕地面积	万亩	L	$CA.K=CA.J+CG.KL \times DT$
CIS	灌溉定额	m ³ /亩	A	$CIS.K=TABLE(Time)$
AW	农业用水量	亿 m ³	A	$AW.K=CIS.K \times CA.K$
FGR	林地面积增长速率	无量纲	A	$FGR.K=Const$
FGS	林地面积增长速度	万亩	R	$FGS.KL=EA.K \times FGR.K \times (1-2 \times WSD.K \times 0.01)$
FA	林地面积	万亩	L	$FA.K=FA.L+FGS.KL \times DT$
FWC	单位林地生态需水量	m ³ /亩	A	$FWC.K=Const$
GGR	草地面积增长速率	无量纲	A	$GGR.K=Const$
GGs	草地面积增长速度	万亩	R	$GGs.KL=GA.K \times GGR.K \times (1-2 \times WSD.K \times 0.01)$
GA	草地面积	万亩	L	$GA.K=GA.L+GGs.KL \times DT$
GWC	单位草地生态需水量	m ³ /亩	A	$GWC.K=Const$
EW	生态需水量	亿 m ³	A	$EW.K=EWC.K \times EA.K$

说明: L 为状态变量, R 为速率变量, C 为常数变量, A 为辅助变量, T 为表函数。

水资源承载力变化情况, 并采用历史检验法验证模型的有效性。结果表明, 耕地、林地和草地的模拟误差均控制在 1% 以内, 总人口模拟误差在 3% 以内, 说明变量的仿真值与历史值基本上吻合, 模型具有较好的强壮性。

以 2020 年为目标年, 综合考虑绿洲农业、社会经济发展和生态环境保护, 参考相关规划, 制定模拟方案(表 2), 进行情景模拟。

1.3.2 景观格局优化

景观格局优化包括数量结构优化与退耕还林空间格局优化两部分。景观数量结构优化基于比较优势理论, 在一定的约束条件下, 基于效益最大化原则, 将土地资源配置给不同用地部门, 以期提高土地利用的总体效益^[36]。该优化系统具有灰色性、动态性和多目标性等多重特征, 变量多且关系复杂, 难以用确定的函数关系来表达。融定量与定性为一体的灰色线性规划模型既可按上限规划, 又可按下限规划, 还可按区间内的任一白化值进行规划, 有较强的适用性^[37]。因此, 本文以水资源承载力、《张掖市“十三五”规划》以及城市规划等为约束条件, 以水资源消耗最小为目标函数, 进行景观格局数量结构优化, 通过将灰色区间白化, 确定不同的景观优化方案, 并结合遗传投影寻踪模型评价与定性分析, 确定最优景观数量结构。

生态建设空间格局优化基于空间适宜度分析, 将各类景观单元重新配置到最适宜的空间单元, 从而识别退耕还林还草及人工造林区的空间格局, 以提高土地利用的综合效益为目的。本文基于 Dyna-CLUES 模型空间分配模块, 选择海拔、坡度、降水、与河流距离、地下水埋深、地下水矿化度、土壤质量、与道路距离、与居民点距离和与灌渠距离等 10 个因子(图 3), 通过计算耕地、林地和草地的

分布概率, 识别不同土地类型对空间单元的竞争性及土地利用的多目标性。采用二值 Logistic 逐步回归^[38]、Autologistic^[39]和基于地理加权回归(GWR)的 logistic 模型^[40]3 种方法, 进行驱动因素回归分析, 通过特征操作曲线(ROC 曲线)^[41]衡量模拟精度, 选取拟合优度最好的回归模型计算土地利用分布概率, 并通过耕地、林地和草地之间的博弈, 识别出退耕还林区、退耕还草区、人工造林区等生态建设空间格局。

2 研究结果

2.1 水资源承载力

以实现 2020 年水资源供需平衡为基本前提, 假定在满足农业、工业、生活用水之后, 剩余水资源全部用于生态用水。2014 年, 研究区域内耕地、林地、草地面积分别为 2724.04, 525.37 和 2101.68 km²。根据林地与草地多年平均耗水总量之比, 确定林地和草地各自可利用的水资源总量, 结合林地和草地的单位面积耗水, 计算 2020 年水资源可维持的最大林地和草地面积。模拟结果表明: 2020 年黑河中游可承载总人口为 144.17 万, 可承载的工业增加值为 79.8 亿元, 可承载耕地、林地和草地的面积分别为 3027.88, 953.54 和 3947.12 km²。

2.2 景观数量结构优化

以 2020 年为目标年, 参考《张掖市国家生态市建设规划(2011—2020)》等规划控制指标, 确定 9 个方面的约束条件。以总耗水量为目标函数, 根据《张掖市“十三五”水利发展规划》, 确定 2020 年耕地单位面积耗水量为 421.11 m³/亩, 林地、草地和建设用地单位面积耗水量分别取多年均值 520.37, 509.19 和 88.49 m³/亩, 水域和未利用地耗水量取 0.01 m³/亩, 确定耗水量目标函数为

表 2 黑河中游水资源承载力情景设置
Table 2 Simulation scenario of water resource capacity in the middle reaches of Heihe River Basin

决策变量	决策依据
耕地面积增长率	农业是黑河中游的支柱, 为了维持绿洲农业的健康发展, 耕地面积增长率取多年均值 0.76%
农业灌溉定额	2012 年黑河中游灌区尺度的灌溉水有效利用系数在 0.5 左右 ^[35] , 根据统计资料, 2012 年灌溉定额 496.54 m ³ /亩, 根据《张掖市“十三五”水利发展规划》, 2020 年农业灌溉水利用系数达到 0.60 以上, 据此确定 2020 年灌溉定额为 421.11 m ³ /亩
万元工业增加值用水量	根据《张掖市“十三五”水利发展规划》, 2020 年万元工业增加值用水量降低到 39 m ³
城市化率	《张掖市城市总体规划(2012—2020)》规定, 确定 2020 年市域城镇化水平为 53%
人口自然增长率	根据《张掖市“十三五”卫生和人口发展规划》, 2020 年人口自然增长率控制在 9‰ 以内
工业增加值增速	为维持社会经济与生态文明的协同发展, 工业增加值取多年均值 3.61%

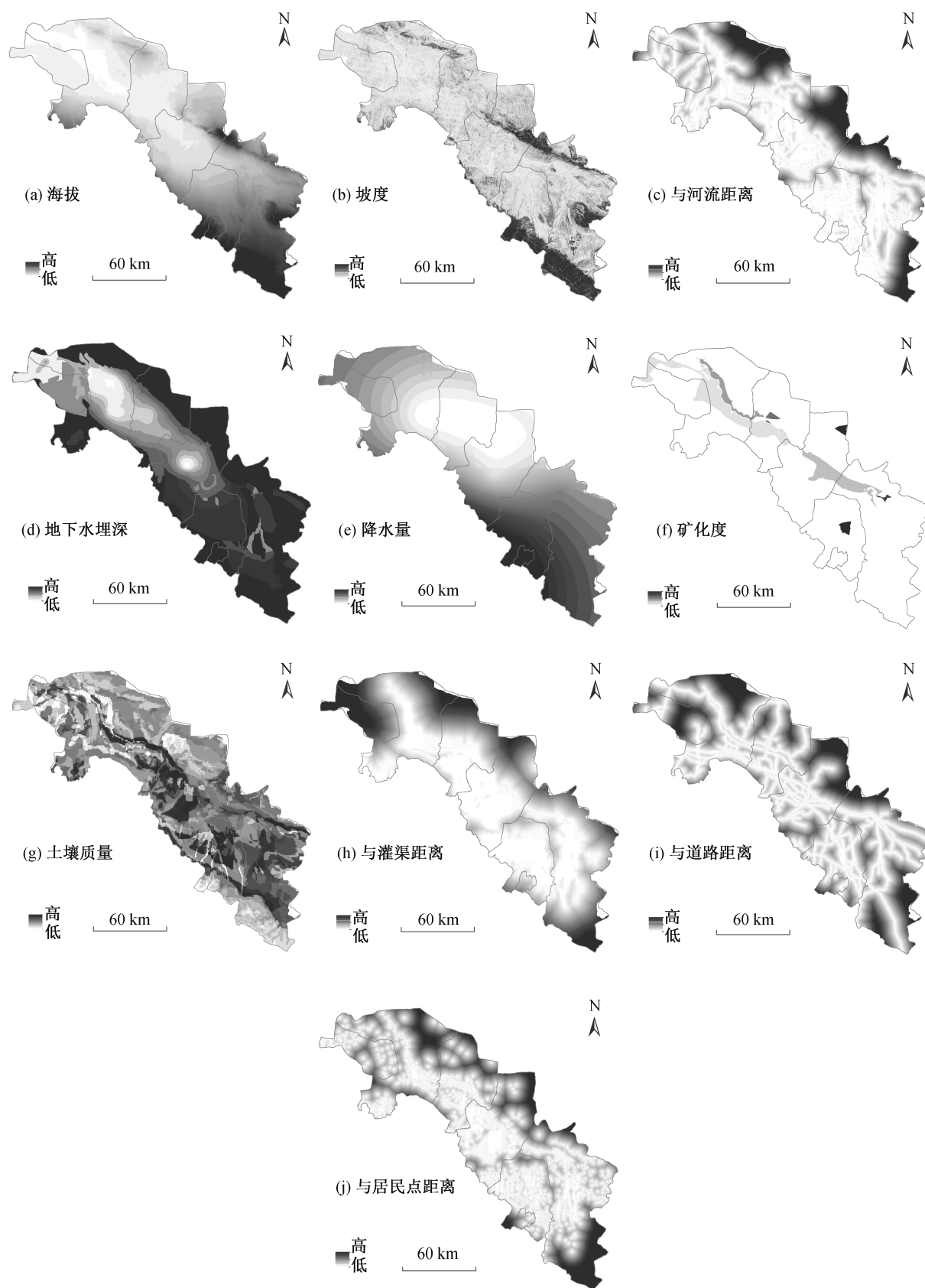


图 3 黑河中游生态建设影响因子

Fig. 3 Impact factors of ecological construction in the middle reaches of Heihe River

$$\min f(x)=421.11x_1+520.37x_2+509.19x_3+0.01x_4+88.49x_5+0.01x_6。$$

在约束系数灰色区间，等间距地确定5组白化值，将以上约束条件和目标函数输入Lingo11软件进行求解，得到5种优化方案(表3)。

采用遗传投影寻踪模型，对以上5种情景的方案进行比较，计算得到各方案的投影值 $z(i)=(0.255, 0.255, 0.255, 0.263, 0.289)$ ，投影值越大则方案越优，各情景的优劣次序为方案5>方案4>方案3=方案2=方案1，可见，方案4与方案5为相对理想的模型。

在方案4中，景观类型主要转出为耕地和未利用地，主要转入为林地和草地，与研究区强调退耕还林、退耕还草以及建造人工林的政策相吻合。在方案5中，未利用地是主要的转出对象，而耕地转出数量极小，受水资源条件的限制，未利用地的开发难度较大，且与当地退耕还林还草的生态建设政策不符。综合上述分析得出结论：方案4为景观数量结构的最优方案。

2.3 生态建设空间格局优化

从表4看出，Autologistic回归模型的ROC精度最高，其中林地模拟精度达到1，建设用地模拟精度高于0.99，耕地、草地、水域和未利用地的模拟精度相对于Logistic和GWR模型也有较大程度的提升。因此，本文基于Autologistic模型计算耕地、林地和草地分布概率(图4)。

根据景观数量结构优化最优方案4，耕地面积

需减少276.15 km²，林地和草地面积需分别增加321.24和83.40 km²。在黑河中游，草地面积的增加需通过退耕进行，确定退耕还草面积83.40 km²，则退耕还林面积为192.75 km²，其余林地需通过人工造林增加128.49 km²。基于土地利用概率分布图，通过对耕地、林地和草地概率分布的博弈进行生态建设空间格局优化，步骤如下。

1) 退耕还林区。以现有耕地为背景，提取耕地、林地和草地的分布概率，选择适宜林地而不适宜草地和耕地的区域为退耕还林区，即提取林地概率大于草地概率，且林地概率与耕地概率之差最大的192.75 km²为退耕还林区。

2) 退耕还草区。以现有耕地为背景，提取耕地、林地和草地的分布概率，选择适宜草地而不适宜林地和耕地的区域为退耕还林区，即提取草地概率大于林地概率，且草地概率与耕地概率之差最大的83.40 km²为退耕还草区。

3) 人工造林区。以现有未利用地为背景，提取林地的分布概率，选择未利用地中最适宜林地的区域作为人工造林区，即提取林地概率最大的128.49 km²为人工造林区域。

从图5可以看出，退耕还林区主要分布在张临高平原，以绿洲边缘的沙化地和质量较差的耕地为主，由于地处绿洲农业核心区外围，多为近年来垦殖开发区域，土地沙化和荒漠化情况严重。退耕还草区集中在山丹县东南部、肃南明花乡和甘州区南部，多为海拔较高、坡度较大、水资源条件较差的耕地，耕作条件较差，且不宜林地利用，是退耕还草的主要分布区。人工造林区集中在民乐和山丹的耕地外围，以地势相对平坦、水资源条件相对优越的未利用地为主，对增强水源涵养、水土保持和防风固沙等生态功能具有重要意义。

3 讨论与结论

3.1 讨论

区域生态需水与生产需水、生活需水同等重要，可反映维持区域生态系统正常发育与相对稳定所必需的最小需水量。生态需水体现区域生态系统管理中新的思维模式，强调水资源、生态系统和社会经济的相互协调。在干旱区，水资源是最关键的生态瓶颈要素，直接制约社会经济发展的规模。在干旱区景观格局优化中，水资源承载力是至关重要的约束因素。在已有的干旱区景观格局优化研究

表3 黑河中游景观数量结构优化方案(km²)
Table 3 Landscape optimization program in the middle reaches of Heihe River Basin (km²)

地类	方案1 (下限)	方案2	方案3 (中间值)	方案4	方案5 (上限)
耕地	3018.64	2882.93	2747.23	2742.49	3013.74
林地	525.22	632.29	739.38	846.46	953.54
草地	2101.17	2128.97	2156.77	2184.57	2212.37
水域	170.67	170.67	170.67	170.67	170.67
建设用地	362.03	362.86	363.68	364.51	365.34
未利用地	13420.20	13420.20	13420.20	13289.23	12882.27

表4 3种回归模型的ROC检验
Table 4 ROC test of the three regression model

回归模型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
Logistic	0.89	0.88	0.85	0.78	0.91	0.85
Autologistic	0.95	1.00	0.94	0.91	0.99	0.92
GWR	0.89	0.74	0.74	0.77	0.94	0.89

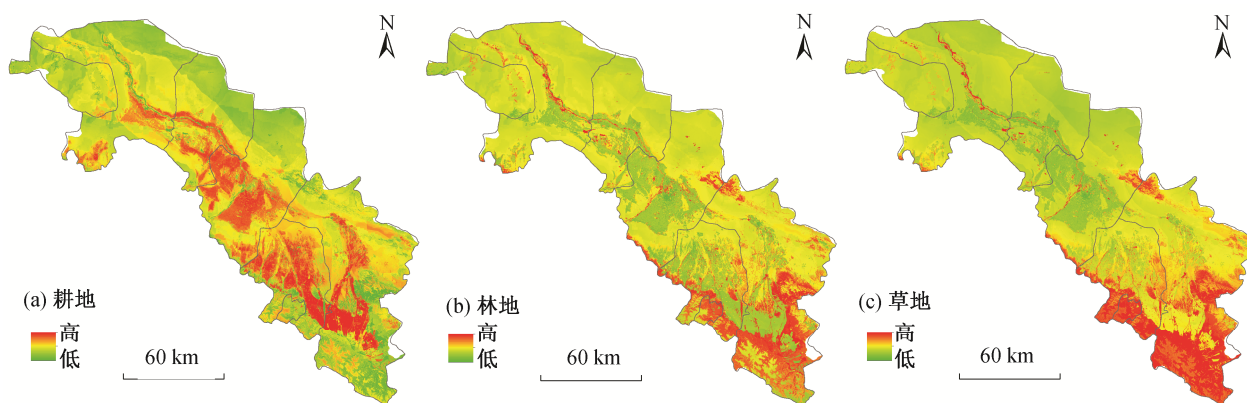


图 4 黑河中游耕地、林地和草地的概率分布

Fig. 4 Probability of cultivated land, forest and grass land in the middle reaches of Heihe River Basin

中,未能凸显水资源承载力对干旱区生态系统健康的约束性。本研究以水资源承载力为基本出发点,假定在水资源满足生产、生活用水之后,剩余部分均用于生态需水,以实现水资源供需平衡为前提,抓住干旱区农业绿洲资源开发利用的关键问题。由于干旱区降水量稀少,水资源多为过境地表径流,水资源承载能力普遍较低。植树造林,一方面需要人工灌溉,才能保证长期存活;另一方面,由于树木水分利用效率较低,耗水量大,严重地消耗地下水,造成水资源的进一步匮乏。草本植物,因其水分利用效率高,耗水量小,是干旱区生态建设的重要选择。本研究基于各类用地的单位面积耗水系数,尤其是在考虑林地和草地对生态需水量的约束

需求基础上,以水资源消耗最小为目标函数进行景观数量结构优化,进而进行生态建设空间格局优化,研究结果与黑河中游实际情况比较吻合。

黑河中游绿洲、荒漠和戈壁镶嵌式分布,属于典型的生态脆弱区。生态建设是生态系统管理的重要途径,生态建设工程的实施,对维持绿洲农业的持续稳定、改善区域生态安全格局以及提高土地多功能利用均具有重要意义。

1) 退耕还林是改善绿洲生态环境、提高防风固沙能力的重要措施。退耕还林区域集中在张临高平原的绿洲边缘地区,在甘州中部灌溉条件较好的退耕地,以种植乔木纯林为宜,增强绿洲防风能力;对高台西部盐渍化严重的退耕地,以沙枣、红柳等混交林为宜;临泽和高台绿洲边缘的退耕地,地处巴丹吉林沙漠边缘,以沙枣、沙棘、柠条、梭梭、花棒等防风固沙林为宜。

2) 退耕还草是调整农业结构、发展质量效益农业和可持续农业的重要途径。退耕还草区集中在山丹县东南部、肃南明花区和甘州区南部。其中,山丹县东南部以紫花苜蓿和垂穗披碱草为宜,以期实现经济效益和改善生态环境的“双赢”;肃南明花区则应以多年生耐盐草本植被(如芨芨草、冰草等)为主;甘州区南部半荒漠草原则以骆驼蓬、羊胡子等为宜。

3) 适宜的人工造林是改善干旱区生态环境质量、提高绿洲生态安全性的重要措施。地处祁连山山麓的民乐和山丹绿洲外围,海拔相对较高,应以水源涵养林和水土保持林为主。民乐县和山丹县中部和南部区域,宜采用林草间作或人工造林与封育自然恢复相结合的方式。

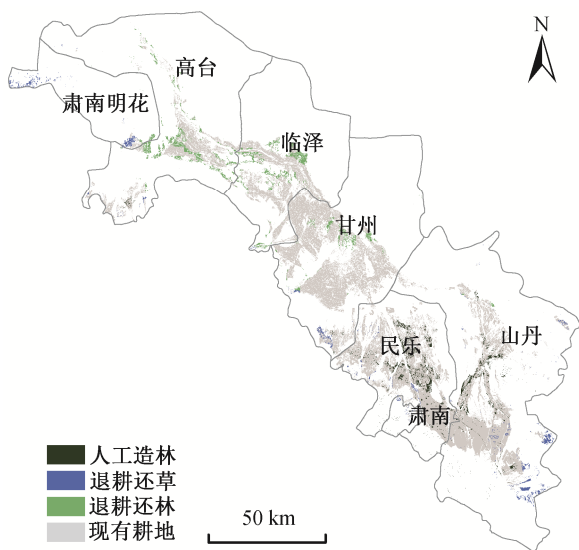


图 5 黑河中游生态建设空间格局优化结果

Fig. 5 Ecological construction spatial optimization result in the middle reaches of Heihe River Basin

3.2 结论

本文以西北内陆干旱区绿洲分布最集中、水资源供需矛盾突出、生态环境脆弱的黑河中游为研究区, 基于基础地理信息数据、自然地理数据、社会经济统计数据以及土地利用数据, 利用系统动力学模型进行水资源承载力揭示, 采用灰色线性规划模型进行景观数量结构优化, 借助 Dyna-CLUES 模型的空间分配模块, 通过对耕地、林地和草地空间分布概率的博弈, 进行退耕还林区、退耕还草区以及人工造林区的生态建设空间识别, 得到如下结论。

1) 以 2020 年为目标年, 在综合考虑生产发展、生活保障和生态优化的情景下, 确定灌溉定额、城市化率、经济增长和分水方案等关键决策变量, 构建研究区水资源承载力 SD 模型, 并采用历史数据验证了模型的有效性, 揭示出在实现水资源供需平衡时, 黑河中游水资源可承载人口为 144.163 万, 可承载工业增加值为 79.73 亿元, 可承载耕地面积为 3027.88 km², 可承载林地面积为 953.535 km², 可承载草地面积为 3947.115 km²。

2) 以水资源承载能力为基本约束条件, 借助趋势预测和 GM(1, 1) 预测模型, 对约束系数、效益系数和目标值等进行预测, 并基于遗传投影寻踪模型对优化方案进行评价, 确定最优景观数量结构优化方案为: 耕地 2742.49 km², 林地 846.456 km², 草地 2184.57 km², 水域 170.671 km², 建设用地 364.509 km², 未利用地 13289.23 km²。与现状相比, 耕地面积减少 276.15 km², 林地面积增加 321.24 km², 草地面积增加 83.4 km²。

3) 基于 Dyna-CLUES 模型空间分配模块, 发现 Autologistic 回归模型的 ROC 精度最高, 通过对耕地、林地和草地三者概率分布的博弈进行生态建设空间格局优化。退耕还林区以张临高平原的沙化和低质量耕地为主, 该区域为绿洲农业核心, 但过度开发导致绿洲边缘土地沙化和荒漠化严重, 亟需退耕还林, 增强绿洲抵御风沙的能力; 退耕还草区集中在山丹、肃南和甘州区, 以海拔较高、坡度较大、水资源条件较差的耕地为主, 土壤耕作条件较差且不宜开发为林地, 应实行退耕还草, 以便减轻区域水资源压力; 人工造林区集中在民乐和山丹的耕地外围, 以地势平坦、水资源条件相对较好的未利用地为主, 对增强区域水源涵养、水土保持和防风固沙等生态功能具有重要意义。

参考文献

- [1] 程国栋. 黑河流域可持续发展的生态经济研究. 冰川冻土, 2002, 24(4): 335-343
- [2] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望. 地理科学进展, 2008, 27(3): 38-46
- [3] 肖洪浪, 程国栋, 李彩芝, 等. 黑河流域生态-水文观测试验与水-生态集成管理研究. 地球科学进展, 2008, 23(7): 666-670
- [4] 程国栋, 赵传燕. 干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1005-1012
- [5] Souro D J. Carrying capacities and standards as bases towards urban infrastructure planning in india: a case of urban water supply and sanitation. Urban Infrastructure Planning in India, 1998, 22(3): 327-337
- [6] Abernethy V R. Carrying capacity: the tradition and policy implications. Ethics of Science and Environmental Politics, 2001(1): 9-18
- [7] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90
- [8] Ehrlich A H. Looking for the ceiling: estimates of Earth's carrying capacity. American Scientist, 1996, 84(5): 494-495
- [9] 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
- [10] 董雯, 刘志辉. 艾比湖流域水资源承载力综合评价. 干旱区地理, 2010, 33(2): 217-223
- [11] 薛小杰, 惠泱河, 黄强. 城市水资源承载力及其实证研究. 西北农业大学学报(自然科学版), 2000, 28(6): 135-139
- [12] 王振江. 系统动力学引论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988
- [13] McHarg I L. Design with nature. Garden City, NY: Doubleday, 1969
- [14] Briggs D, France J. Classifying landscapes and habitats for regional environmental planning. Journal of Environmental Management, 1983, 19(3): 249-261
- [15] Steiner F, Brooks K. Ecological planning: a review. Environmental Management, 1981, 5(6): 495-505
- [16] De Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 260-272
- [17] Forman R T T. Land mosaics: the ecology of land-

- scapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- [18] Lindenmayer D, Hobbs R J, Montague-Drake R, et al. A checklist for ecological management of landscapes for conservation. *Ecology Letters*, 2010, 11(1): 78–91
- [19] Aguilera F, Valenzuela L M, Botequilha-Leitao A. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(3/4): 226–238
- [20] Verboom J, Wamelink W. Spatial modeling in landscape ecology // Wiens J A, Moss M R. *Issues in landscape ecology: proceedings of the fifth world congress*. Snowmass Village, CO: International Association for Landscape Ecology, 1999: 38–44
- [21] Jones M. The European landscape convention and the question of public participation. *Landscape Research*, 2007, 32(5): 613–633
- [22] Spies T A, White E M, Kline J D, et al. Examining fire-prone forest landscapes as coupled human and natural systems. *Ecology and Society*, 2014, 19(3): 9
- [23] Hulse D, Goorjian L, Richey D, et al. *Possible futures for the Muddy Creek Watershed, Benton County, Oregon*. Eugene, OR: University of Oregon, 1997
- [24] 刘彦随. 区域土地利用优化配置. 北京: 学苑出版社, 1999
- [25] Verburg P H, Tabeau A, Hatna E. Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: a study for land use in Europe. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127(3): S132–S144
- [26] 李鑫, 李宁, 欧名豪. 土地利用结构与布局优化研究述评. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(11): 103–110
- [27] Chuai X, Huang X, Lai L, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25(25): 50–61
- [28] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学: 地球科学*, 2005, 35(5): 464–473
- [29] Liu Y L, Tang W, He J H, et al. A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 49: 1–14
- [30] 张济世, 康尔泗, 赵爱芬, 等. 黑河中游水土资源开发利用现状及水资源生态环境安全分析. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 207–213
- [31] 陈隆亨, 李福兴. *河西地区土壤*. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 24–92
- [32] 朱一中, 夏军, 王纲胜. 张掖地区水资源承载力多目标情景决策. *地理研究*, 2005, 24(5): 732–740
- [33] 侯兰功, 肖洪浪, 邹松兵, 等. 黑河流域水循环特征研究. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 254–258
- [34] 朱洁, 王烜, 李春晖, 等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(2): 32–39
- [35] 闫昕. 黑河中游灌区不同尺度灌溉水有效利用系数估算[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015
- [36] 李鑫, 马晓冬, 肖长江, 等. 基于 CLUE-S 模型的区域土地利用布局优化. *经济地理*, 2015, 35(1): 162–167
- [37] 倪琳. 基于生态绿当量的土地利用结构优化研究——以湖北省潜江市为例. *资源与产业*, 2008, 8(4): 51–58
- [38] 许小亮, 李鑫, 肖长江, 等. 基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化. *生态学报*, 2016, 36(17): 5401–5410
- [39] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例. *地理研究*, 2010, 29(3): 460–470
- [40] 邵一希, 李满春, 陈振杰, 等. 地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用——以常州市孟河镇为例. *地理科学*, 2010, 30(1): 92–97
- [41] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1/2/3): 239–248