

# 保护地生态承载力不确定性多目标优化模型研究

## ——以黄河源区玛多县为例

王慧慧<sup>1,2,3</sup>, 曾维华<sup>1,4\*</sup>, 马冰然<sup>1</sup>, 李晴<sup>1</sup> (1.北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2.北京师范大学流域环境生态工程研发中心, 广东 珠海 519087; 3.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4.中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 为明确给出保护地综合生态承载力的实质内涵“人类活动强度阈值”, 利用不确定性多目标优化方法, 建立了区域保护地生态承载力优化模型. 应用该模型对黄河源区玛多县进行区域保护地生态承载力评价及规模结构优化. 结果表明: 草畜矛盾是制约玛多县社会经济发展的瓶颈; 根据《三江源国家公园总体规划》目标, 在保证野生动物种群数量发展的同时畜牧业发展相对较为迅速, 2020年、2025年和2035年玛多县地区畜牧业(家牦牛)规模分别为287615~363303羊单位, 302752~438991羊单位, 378440~514679羊单位. 由于保护地生态环境容量的限制, 黄河源区玛多县需控制其人口与旅游规模, 2020年、2025年和2035年牧民人口规模区间分别为1.25~1.65万人、1.65~1.83万人和1.863~2.135万人. 2020年旅游规模最大为4.113万人次, 2025年为4.700万人次, 2035年为5.396万人次, 在规划目标情景下旅游业发展减缓, 主要是考虑了三江源国家公园规划试点以及地方规划对旅游的限制开发, 旨在保护地方生物多样性以及生态环境.

**关键词:** 生态承载力; 多目标优化; 载畜量; 玛多县

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1300-11

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0145

**Ecological carrying capacity of protected areas uncertain type multi-objective optimum model-Using Maduo County in the source region of the Yellow River as example.** WANG Hui-hui<sup>1,2,3</sup>, ZENG Wei-hua<sup>1,4\*</sup>, MA Bing-ran<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup> (1.School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Research and Development Center for Watershed Environmental Eco-Engineering, Beijing Normal University at Zhuhai 519087, China; 3.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4.Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1300~1310

**Abstract:** “Threshold value of human activity intensity” can be defined as the essence of integrated ecological carrying capacity of protected areas. In order to explore its definition, we established an optimization model of ecological carrying capacity of protected areas by using uncertainty multi-objective optimization method. The model was used to evaluate the ecological carrying capacity and optimize the scale structure of the protected area in Maduo County, the Yellow River source region. The results show that the conflict between grass and livestock was the bottleneck restricting the social and economic development of Maduo County. According to the goal of “Three-River Source National Park General Plan”, animal husbandry development was relatively rapid while ensuring the number of wildlife population. The scale of domestic yak in Maduo County will reach 287615~363303 sheep units in 2020, 302752~438991 sheep units in 2025, and 378440~514679 sheep units in 2035, respectively. Considering the limitation of the ecological environment capacity of the protected area, the scale of population and tourism should be controlled in Maduo County the source region of the Yellow River. The population scale range of herdsmen is 12500~16500 in 2020, 16500~18300 in 2025, and 18630~21350 in 2035, respectively. The largest tourism scale is 41130 person-time in 2020, 47000 person-time in 2025 and 53960 person-time in 2035. In the planning target scenario, the development of tourism slows down, which can be attributed to the pilot project of Three-River Source National Park and the restriction of local planning on tourism development, aiming to protect local biodiversity and ecological environment.

**Key words:** ecological carrying capacity; multi-objective optimization; stocking capacity; Maduo County

建立生态保护地体系是实施生态保护的重要手段<sup>[1]</sup>.为推进自然资源科学保护和合理利用,促进人与自然和谐共生,2017年9月我国首次提出建立国家公园体制<sup>[2]</sup>,并明确提出“构建国土空间开发保护制度,完善主体功能区配套政策,建立以国家公园为

主体的自然保护地体系”.现阶段,我国自然保护

收稿日期: 2020-07-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0506403);中国科学院青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-01);中国博士后科学基金项目(2020M680431)

\* 责任作者, 教授, zengwh@bnu.edu.cn

地建设比较完善,拥有自然保护区、国家公园、森林公园、地质公园、湿地公园、风景名胜區等诸多类型<sup>[3]</sup>,自然保护地是生物多样性保护战略重点区域,是国家生态安全关键区域,是推进我国生态文明建设的关键手段<sup>[4-5]</sup>。然而,面对快速城市化的今天,多数自然保护地的生态系统与自然文化遗产受到自然因素和人为因素的威胁。

生物多样性危机已成为世界各国面临的一项重大挑战,造成这一现象的原因包括人类活动增强、资源过度开发和利用、道路等基础设施建设增多、栖息地减少与破碎化、环境污染、物种入侵、以及气候变化等,其中人类活动造成栖息地丧失和破碎化是生物多样性减少的首要原因<sup>[4]</sup>。应对上述危机的有效措施是建立自然保护地网络,自然保护地能够为人类社会提供多种重要的生态系统服务(包括支持服务、供给服务、调节服务和文化服务),从而支持人类社会的可持续发展。改革开放以来,我国自然保护地的数量和面积出现了大幅增长,建立了国家公园体制试点区、自然保护区、风景名胜區、地质公园、湿地公园,以及森林公园等多种类型的自然保护地<sup>[6]</sup>。至今,中国陆地自然保护地覆盖率已达18%,其中自然保护区覆盖率达14.8%<sup>[7]</sup>。然而,我国生物多样性下降的总体趋势尚未得到有效遏制。据估计,我国野生高等植物濒危比例达15%~20%,野生动物濒危程度不断加剧,有233种脊椎动物面临灭绝,约44%的野生动物数量呈下降趋势,非国家重点保护野生动物种群下降趋势明显<sup>[8]</sup>。

为有效管理草原生物多样性和取得最大经济效益,一些学者将承载力理论引入到草原管理中,随之草地承载力、最大载畜量等相关概念被提出。生态承载力指在一定区域范围内,作为子项的自然资源、生态环境以及社会经济等协调可持续发展的前提下,自然-经济-社会复合生态系统所能最大限度地容纳的人类活动强度<sup>[9-10]</sup>。生态承载力概念的诞生,可以说是对资源与环境承载力概念的扩展与完善。目前应用于生态承载力的研究方法众多,其中自然植被第一性生产力法、供需平衡法、生态承载力综合评价法、状态空间法和生态足迹法等应用较为广泛<sup>[11-13]</sup>。然而大多数学者还是延续了矢量模法的思路,建立生态承载力指标体系,利用各种综合评价方法对区域生态承载力进行综合评价,而忽略了生态

承载力矢量表征方法,以及基于多目标规划方法,对承载人口与经济规模阈值的进一步研究,即使利用多目标优化方法也只涉及生态承载力的单要素,最终仍归结于生态承载力指数<sup>[14]</sup>。生态承载力研究的目的在于确定具体生态系统所能承载人类活动的阈值(适度人口与经济规模)。确保一个地区生态系统功能结构不被破坏前提下,生态系统所能承载的适度人口与经济规模,才是研究生态承载力的实质。鉴于此,本研究针对多种类型保护地社区与生态保护对象空间分布错综复杂的特点,建立一种保护地生态综合承载力核算技术,通过对保护地生态承载力进行评估,以期权衡保护与开发之间的矛盾,促进自然保护地的可持续发展;本研究以黄河源区玛多县为例,构建一种区域生态承载力不确定性多目标优化模型,确定保护地适度发展规模与结构;从宏观规模、结构优化调控角度,研发保护地经济建设和与自然生态保护协调发展的创新技术方法。

## 1 保护地生态承载力不确定性多目标优化模型

### 1.1 保护地综合生态承载力概念与表征方法

1.1.1 概念内涵 承载力源于物理力学中的一个物理量,指物体在不产生任何破坏时的最大负荷<sup>[11-15]</sup>。生态承载力是目前生态系统可持续性研究中的重要议题。而保护地生态系统主要是以提供生态系统服务为核心,具有一定的自我调节能力,当外力与人为干扰的程度超过生态系统本身的承载与调节能力范围时,系统平衡和生态系统服务功能会被破坏。因此,保护地内所承载的一切活动都必须限制在生态系统所能承载干扰的阈值之内,这一承载阈值即保护地生态系统的承载力。

本研究将保护地综合生态承载力定义为生态系统在保护地生态空间、生产空间、生活空间和游憩空间当中维持其重要生态系统服务功能的能力。即保护地综合生态承载力是指在确保保护地生态系统功能结构不被破坏,以及野生动物可持续生存繁衍前提下,保护地生态系统可持续支撑人类活动强度阈值,其中人类生活活动强度是指人类生活代谢对资源的需求与污染物排放对生态系统的影响程度;放牧与生态旅游等活动强度是人类生产活动需要的资源与排放的污染物对生态系统的干扰程度。

1.1.2 表征方法 对于保护地综合生态承载力的量化,可利用发展变量与限制变量间的关系来定量描述<sup>[16-18]</sup>.表示区域人类生活活动强度以及放牧与生态旅游等活动强度的变量是发展变量,可以通过区域的总人口、地区生产总值、旅游规模、载畜规模、能源和资源利用量以及各种污染物排放量来表征,以上因素的集合构成发展变量集合,其中的元素被称为发展因子,可表示为  $n$  维矢量:

$$\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (1)$$

与发展变量相对应的是限制变量,是指资源、能源和生态系统条件对人类生活活动以及放牧与生态旅游等活动限制的体现.与发展变量相似,限制变量集合是由全体限制因素组成,集合中元素称为限制因子,同样可用  $n$  维矢量表示:

$$\vec{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (2)$$

在此基础上,保护地综合生态承载力可以表示为在不超过限制变量阈值的范围内,发展变量的最大值,同理可以表示为  $n$  维矢量:

$$\vec{d}^* = (d_1^*, d_2^*, \dots, d_n^*) \quad (3)$$

因此保护地综合生态承载力可以表示成在相应的产业结构下,区域资源、能源和生态系统所能负载的人口数与经济规模的阈值,即区域资源、能源和生态环境所能承载的最大人口数与经济规模,它是保护地区产业结构调整的基础.

三江源国家公园以草地生态系统为主,其综合生态承载力表示为一定时期内,一定社会经济条件,维持保护地草地生态系统多样性与完整性,不危害保护物种可持续生存繁衍前提下,草地生态系统所能负载的人口数、旅游规模及载畜规模的阈值,它是保护地区经济建设与生态保护协同,维持保护地持续健康发展的基础.本研究针对三江源国家公园生态系统的特点,主要选择草地生态系统畜牧业规模(载畜量)与放牧结构,以及旅游规模作为优化目标,对区域生态承载力和载畜规模进行优化调控.首先给出研究区具体的发展因子和限制因子.

#### (1) 发展因子选择

发展变量用以度量人类活动(生活活动与经济开发活动)对生态系统作用的强度,以各种资源利用量与向环境排放的各种污染物量表示,它们的全体

构成发展变量集,集合中的元素称为发展因子.黄河源区玛多县地区发展因子包括:人口规模、放牧结构、载畜规模、旅游规模.

#### (2) 限制因子选择

限制因子是生态系统状况对人类活动限制作用的表现.通常,限制因子可分为以下几类:环境类限制因子、资源类限制因子、市政工程类限制因子与心理类限制因子.针对三江源国家公园生态系统的特点,黄河源区玛多县地区限制因子包括:野生动物规模、产草量、旅游承载力指标、草地面积指标、保护区面积指标.

综上所述,三江源国家公园黄河源区玛多县地区发展变量集  $D$  可规定为:

$$D = \{D_P, D_T, D_N\} \quad (4)$$

式中: $D_P$  为人口规模; $D_T$  为旅游规模; $D_N$  为载畜规模.

对应限制因子集  $C$  为:

$$C = \{C_W, C_G, C_T, C_{GA}, C_{BA}\} \quad (5)$$

式中: $C_W$  为野生动物规模约束; $C_G$  为产草量约束指标; $C_T$  为旅游承载力约束指标; $C_{GA}$  为草地面积约束指标; $C_{BA}$  为保护区面积约束指标.

## 1.2 生态承载力约束下的不确定性多目标优化模型构建

1.2.1 不确定性多目标优化研究概述 多目标优化问题得到的是 Pareto 优化解集或非被占优解集.目前多目标优化方法已成功应用于多个领域,例如能源系统优化<sup>[19]</sup>、工业生产过程优化<sup>[20]</sup>、能源消费预测与优化<sup>[21]</sup>、基于环境承载力的排污权分配<sup>[22]</sup>、水资源配置<sup>[23-24]</sup>、固体废弃物管理<sup>[25]</sup>、人力资源调度模型<sup>[26]</sup>、供应链优化<sup>[27]</sup>和基于水资源约束的产业结构优化<sup>[28]</sup>等.作为生态系统功能结构表征的生态承载力是由多个分量构成的,且总是存在诸多不确定性,因此在研究生态承载力时选择不确定性多目标优化方法会更为有效(IFMOP, Inexact fuzzy multi-objective programming),IFMOP 允许将不确定性作为区间直接引入到规划流程中<sup>[29-30]</sup>.该方法已成功应用于工程应用,如在区域发展规划<sup>[31]</sup>、区域产业优化<sup>[32]</sup>和环境经济管理<sup>[33]</sup>.

1.2.2 不确定性多目标优化概念模型 本研究建立了一个生态承载力约束下的保护地区发展规模与结构优化的概念模型(Optimal Model of Development Scale and Structure Optimization of

Protected Area under the Constraint of Ecological Carrying Capacity, OMDSSOPECC).一般形式:

$$\begin{aligned} \max P &= \sum_j^n p_i^\pm x_i^\pm \\ \max N &= \sum_i^m q_i^\pm x_i^\pm \\ \text{约束条件} \\ x^\pm &\in \bar{d}_j^*, j=1,2,3,4; \\ x^\pm &\in b_i^\pm, i=1,2,3; \\ (\mathbf{I}-\mathbf{A})x^\pm &\in Z^\pm \\ x^\pm &\in U^\pm \\ \text{非负约束} \\ x^\pm &\geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $i=1,2,\dots,n$  为待选产业;  $\pm$  表征参变量的上下限;  $x^\pm$  为不确定性决策变量;  $b_i^\pm$  为不确定污染防治费用系数;  $p_i$  为不确定单位决策变量人口数;  $N_i$  为不确定单位决策变量载畜规模;  $\bar{d}_j^*$  表示不确定性生态承载力约束条件;  $b_i^\pm$  表示不确定各产业比例约束;  $\mathbf{I}$  表示投入产出表单位矩阵;  $\mathbf{A}$  表示投入产出表直接消耗系数;  $Z^\pm$  表示不确定最终产品;  $U^\pm$  表示不确定总产出。

1.2.3 综合生态承载力约束下的玛多县发展规模与结构优化模型建立 综合考虑玛多县生态系统各方面因素,构建一个适合该区域的生态承载力不确定性多目标优化模型,通过设定目标函数和约束条件,其中目标函数包括适度人口规模、区域最大载畜量以及适度旅游规模三部分,约束条件考虑产草量约束、旅游环境承载力约束、土地资源等承载力分量约束、野生动物保护约束、人口规模约束以及旅游规模约束等,构建模型如下:

1)目标函数:

$$\max P = \sum_i^m \delta_i^\pm P_i^\pm + \sum_j^n (1-\delta_j^\pm) P_j^\pm \quad (7)$$

$$\max N = \sum_k^l N_k^\pm + N_{\text{wild}}^\pm \quad (8)$$

式中:  $P_i^\pm$  为居民人口规模,人;  $P_j^\pm$  为旅游人口规模,人次;  $\delta$  为居民人口占区域可承载人口规模比例,%;  $N_k^\pm$  分别为第  $i$  种载畜规模(这里指牛、羊、马),羊单位;  $N_{\text{wild}}^\pm$  为野生动物规模,羊单位。

2)约束条件:

(1)野生动物规模约束:

$$\frac{1}{k^\pm} N_{\text{wild}}^\pm \leq Q_{\text{wild}}^\pm \quad (9)$$

式中:  $N_{\text{wild}}^\pm$  为野生动物规模,羊单位;  $k^\pm$  为食物占有率,%;  $Q_{\text{wild}}^\pm$  为最大承载野生动物规模,羊单位。

(2)产草量约束:

$$\sum_i^m \delta_i^\pm N_i^\pm + \delta_{\text{wild}}^\pm N_{\text{wild}}^\pm \leq GS^\pm \quad (10)$$

式中:  $\delta_i^\pm$  分别为第  $i$  种动物(这里指牛、羊、马)的可食用草量,kg/羊单位;  $\delta_{\text{wild}}^\pm$  为野生动物的可食用草量,kg/羊单位;  $N_i^\pm$  分别为第  $i$  种(这里指牛、羊、马)载畜规模,羊单位;  $GS^\pm$  为最大可食用草量,kg。

(3)旅游环境承载力指标约束:

① 旅游资源约束

旅游资源约束主要包括生活垃圾、生活污水指标的约束:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{a_i^\pm \times t_i^\pm}{\lambda_i^\pm} \times P_i^\pm \right) + \left( \frac{a_j^\pm \times t_j^\pm}{\lambda_j^\pm} \times P_j^\pm \right) \leq D^\pm \times \\ & (e^\pm + \theta^\pm (1-e^\pm)) \times h^\pm \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $a_i^\pm$  和  $a_j^\pm$  分别为当地居民和旅游者在相应满意度下平均每人日生产垃圾量或污水排放量,kg/(人·d);  $t_i^\pm$  和  $t_j^\pm$  分别为依次为当地居民和旅游者的平均逗留天数,天;  $\lambda_i^\pm$  和  $\lambda_j^\pm$  分别为相应情况下当地居民和旅游者的满意度,%;  $D^\pm$  表示生活垃圾或污水排放量,kg;  $e^\pm$  表示资源的实际利用率,%;  $\theta^\pm$  表示资源剩余部分的使用程度,%;  $h^\pm$  为资源的周转率,%;  $h$ =开放时间/旅游时间,但在实际计算过程中要考虑某些资源的约束条件不具周转情形,因此,具体问题要具体分析。

② 以面积为限制性因子的计算公式如下:

$$\frac{S^\pm \times O^\pm}{A^\pm \times D^\pm} < E_1^\pm \quad (12)$$

$$\frac{S^\pm}{A^\pm} < E_1^{\prime\pm} \quad (13)$$

式中:  $E_1^\pm$  为时段旅游环境承载力,人;  $E_1^{\prime\pm}$  为  $E_1^\pm$  瞬时值;  $S^\pm$  为游览区面积,m<sup>2</sup>;  $O^\pm$  为开放时间,h;  $A^\pm$  为人均占用的合理面积,m<sup>2</sup>/人;  $D^\pm$  为游览区停留时间,即游览本区所需要的时间,h.当  $O^\pm$  为日有效开放时间时,  $E_1^\pm$  为日旅游环境承载力;当  $O^\pm$  为年有效开放时间时,  $E_1^\pm$  为年旅游环境承载力。

③ 以长度为限制性因子的计算公式如下:

$$\frac{L^\pm \times O^\pm}{L_0^\pm \times D^\pm} < E_2^\pm \quad (14)$$

$$\frac{L^{\pm}}{L_0^{\pm}} < E_2^{\pm} \quad (15)$$

式中:  $E_2^{\pm}$  为时段旅游环境承载力,人;  $E_2^{\pm}$  为  $E_2^{\pm}$  瞬时值;  $L^{\pm}$  为游览线路长度,m;  $O^{\pm}$  为开放时间,h;  $L_0^{\pm}$  为游客间适当距离间隔,m/人;  $D^{\pm}$  为游览完毕需要时间,h. 当  $O^{\pm}$  为日有效开放时间,  $E_2^{\pm}$  为日旅游环境承载力; 当  $O^{\pm}$  为年有效开放时间,  $E_2^{\pm}$  为年旅游环境承载力.

④ 旅游环境承载力综合值计算公式如下:

$$\frac{\sum_{i=1}^n E_i^{\pm} \times O_i^{\pm}}{D^{\pm}} < TEC^{\pm} \quad (16)$$

式中:  $TEC^{\pm}$  为旅游地旅游环境承载力瞬时值;  $E_i^{\pm}$  为第  $i$  个游区承载力瞬时值;  $O_i^{\pm}$  为有效开放时间;  $D^{\pm}$  为游客完成全部游览活动所需时间;  $n$  为游区数.

(4)草地面积约束:

$$GS^{\pm} \leq GLA^{\pm} \quad (17)$$

式中:  $GLA^{\pm}$  为最大草地面积.

(5)野生动物保护区约束:

$$Q_c^{\pm} \leq Q_{wild}^{\pm} \leq Q_c^{\pm} + Q_h^{\pm} \quad (18)$$

式中:  $Q_{wild}^{\pm}$  为野生动物保护区面积;  $Q_c^{\pm}$  为保护区核心区面积;  $Q_h^{\pm}$  为保护区缓冲区面积.

(6)人口规模约束:

$$P_i^{\pm} \leq MAXP_i^{\pm}; MINP_i^{\pm} \leq P_i^{\pm}; \quad (19)$$

式中:  $MAXP_i^{\pm}$  为人口规模上限,人;  $MINP_i^{\pm}$  为人口规模下限,人.

(7)旅游规模约束:

$$P_j^{\pm} \leq MAXP_j^{\pm}; MINP_j^{\pm} \leq P_j^{\pm}; \quad (20)$$

式中:  $MAXP_j^{\pm}$  为旅游规模上限,人;  $MINP_j^{\pm}$  为旅游规模下限,人.

(8)非负约束:

$$P_i^{\pm} \geq 0; P_j^{\pm} \geq 0; N_k^{\pm} \geq 0 \quad (21)$$

## 2 黄河源区玛多县生态承载力及规模结构优化

### 2.1 研究区概况

三江源地区是青藏高原生态系统的典型代表区域,也是青藏高原生态屏障重要的组成部分.三江源国家公园是中国首个国家公园体制试点区,包括黄河源、长江源、澜沧江源三个子园区.其中黄河源区玛多县隶属果洛藏族自治州,位于青海省南部,巴颜喀拉山北麓(96°50'N~99°20'E, 33°50'N~35°40'E),

土地面积 2.53 万  $km^2$ ,属高原地区,平均海拔 4200m(图 1).

近年,青海省在“生态立省”理念的指导下,加大了三江源地区的生态保育与恢复力度,大力实施的三江源生态保护和建设工程.虽然玛多县生态保护取得了阶段性成果,生态效益有所提高,但整体来说,玛多县作为传统牧区县,草地生态系统是主体生态系统,其生态本底脆弱,生态环境承载力压力较大.因此,有序整合生态保护与牧民生计的冲突,进一步协调生态保护与经济建设的矛盾,如此才能保障区域生态系统朝着良性方向演化.

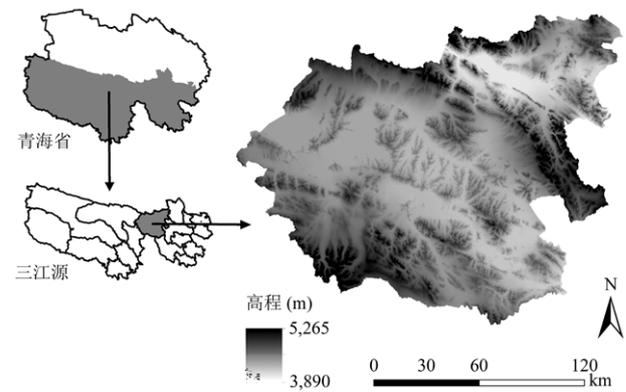


图 1 研究区区位

Fig.1 Location of the study area

### 2.2 模型参数选取

表 1 不确定性多目标优化模型的主要约束参数

Table 1 Main constraint parameters of the uncertain type multi-objective optimum model

| 参数                | 目标(年)   |         |         |
|-------------------|---------|---------|---------|
|                   | 2020    | 2025    | 2035    |
| 人口(万人)            | 1.65    | 2.15    | 2.45    |
| 垃圾处理率(%)          | 100     | 100     | 100     |
| 污水处理率(%)          | 50      | 80      | 100     |
| 可利用草地面积( $km^2$ ) | 22525.6 | 22525.6 | 22525.6 |
| 产草量(kg)           | 125     | 155     | 215     |
| 野生动物规模(万羊单位)      | 30      | 30      | 30      |
| 载畜规模(万羊单位)        | 48      | 58      | 68      |

通常自然保护地按照被保护的重要性和可利用性划可分为核心区、缓冲区、实验区或旅游区.因此,在进行生态承载力核算时,空间范围的界定可以在各类保护地现有功能分区的基础上,以保持生态系统完整性为原则,遵从保护面积不减少、保护强度不降低、保护性质不改变的总体要求,将功能分区

对应于相应的生态、生产、生活、旅游功能空间,合理确定承载力核算的边界范围.对于不同承载力对象,分别参照对应方法,搜集统计数据、调查数据,计算每一类生态系统服务的供给量和承载对象的个体消耗量.由于不同类型保护地的保护目标和社会经济发展现状不一,达到承载力的精确核算较为困难,因此需根据案例区的自然属性、生态价值和管理目标对承载力核算中生态系统服务消耗量设置相应的约束参数.

本研究根据《三江源国家公园总体规划》目标,将规划期分近期(2020年)与远期(2025和2035年)3个阶段.数据来源包括遥感图像解译、中国科学院资源环境科学与数据中心、青海年鉴、青海省统计年鉴、玛多县国民经济和社会发展统计公报及年鉴、三江源国家公园规划及相关文献<sup>[34-37]</sup>(表1和表2).参数的不确定性是通过取值区间解决的,取值空间多从获取信息中直接确定,其他部分参数采用取中间值上下浮动10%的方法确定取值空间.

表2 模型重要参数

Table 2 Important parameters of the model

| 年份   | 总人口(人) | 农牧民人口(人) | 城镇人口(人) | 农牧业(万元) | 旅游业(万元) | 农牧民人均可支配收入(元) | 接待游客人数(万人次) |
|------|--------|----------|---------|---------|---------|---------------|-------------|
| 2013 | 14826  | 10990    | 3836    | 5059.7  | 1938.7  | 4072          | 3.4         |
| 2014 | 14874  | 11049    | 3825    | 5405    | 2689    | 4607          | 4.46        |
| 2015 | 14982  | 10988    | 3994    | 5377.2  | 3442.6  | 5351          | 5.42        |
| 2016 | 15075  | 11147    | 3928    | 5732.1  | 4583.6  | 5865          | 6.59        |
| 2017 | 15604  | 11597    | 4007    | 6083.8  | 6295.2  | 6491          | 9.25        |
| 2018 | 15714  | 12374    | 3340    | 6827.3  | 3525    | 7401          | 4.89        |

| 年份   | 载畜量(羊单位) | 产草量(kg) | 可利用草地面积(km <sup>2</sup> ) | 可利用生草地容纳量(万羊单位) | 草畜平衡区容纳量(万羊单位) | 可利用草地面积(km <sup>2</sup> ) | 草畜平衡区(km <sup>2</sup> ) |
|------|----------|---------|---------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|-------------------------|
| 2013 | 33724    | 95      | 22525.6                   | 145             | 36             | 22536.86                  | 5788.226                |
| 2014 | 34355    | 80      | 22525.6                   | 122             | 30             | 22536.86                  | 5788.226                |
| 2015 | 35315    | 90      | 22525.6                   | 137             | 34             | 22536.86                  | 5788.226                |
| 2016 | 36015    | 100     | 22525.6                   | 153             | 38             | 22536.86                  | 5788.226                |
| 2017 | 37699    | 110     | 22525.6                   | 168             | 42             | 22536.86                  | 5788.226                |
| 2018 | 38829    | 116     | 22525.6                   | 177             | 44             | 22536.86                  | 5788.226                |

## 2.3 方案设计与模型求解

### 2.3.1 方案设计

本研究基于构建的保护地生态承载力不确定性多目标优化模型,对保护地生态系统供给能力的计算和承载对象消耗量的统计,评估该保护地生态承载力,包括适度人口规模、区域最大载畜量以及适度旅游规模.由于黄河源园区内主要是以畜牧业和旅游业为生态系统提供供给服务的主要来源,因此对社会经济活动承载力模型进行相应简化.本研究以2018年为基准年,2020、2025、2035年为目标年,设定两种情景:基准情景(BAU情景)和规划目标情景(PO情景),利用构建的不确定性多目标优化模型对玛多县不同情景下区域发展规模与结构进行优化.本研究主要利用LINGO软件对黄河源区玛多县生态承载力不确定性多目标优化模型进行求解.

### 2.3.2 模型求解

不确定性多目标优化模型求解,需结合FLP转换、模糊目标构建、ILP转换、目标

分解与不确定多目标优化子模型构建以及最终人机交互等步骤完成整个模型求解过程<sup>[14]</sup>.

## 2.4 结果分析

利用构建的不确定性多目标优化模型对不同情景进行求解,BAU情景下的求解结果如表3所示,规划目标情景下的求解结果见表4.

### 2.4.1 区域野生动物规模分析

玛多县黄河源园区内的核心保育区和生态保育修复区是野生动物的重要栖息地,植被类型以高寒草原和高寒草甸为主.玛多县可利用草地面积为22536.86km<sup>2</sup>.该地区广泛分布的大型食草野生动物为藏野驴和藏原羚,每只藏野驴换算为4个羊单位,每只藏原羚换算为0.5个羊单位.地区在发展畜牧业的同时保护野生动物种群数量,经计算玛多县可以承载野生动物为30万个羊单位.根据多目标优化模型计算不同情景下玛多县野生动物规模(图2和图3),由图可知,BAU情景下,2020年玛多县野生动物规模在

31808~35438 羊单位,2025 年的规模为 332316~48220 羊单位,2035 年的规模为 56108~63847 羊单位,在此情景下野生动物规模发展迅速,但距离经济发展目标较远.

表 3 BAU 情景下的规模与结构  
Table 3 Scale and structure in BAU scenario

| 项目          | 2020 年 |        | 2025 年 |        | 2035 年 |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     |
| 总人口规模(万人)   | 1.975  | 2.705  | 2.164  | 3.433  | 2.329  | 3.750  |
| 农牧民人口规模(万人) | 1.525  | 2.202  | 1.740  | 2.836  | 1.852  | 3.135  |
| 城镇人口规模(万人)  | 0.450  | 0.503  | 0.424  | 0.597  | 0.577  | 0.625  |
| 旅游规模(万人次)   | 7.899  | 9.017  | 8.656  | 11.445 | 9.716  | 12.533 |
| 家牦牛(羊单位)    | 246138 | 389037 | 258905 | 458972 | 278432 | 558426 |
| 藏羊(羊单位)     | 74587  | 117890 | 78456  | 139083 | 84373  | 169220 |
| 马(羊单位)      | 4475   | 7073   | 4707   | 8345   | 5062   | 10153  |
| 野生动物(羊单位)   | 31808  | 35438  | 32316  | 48220  | 56108  | 63847  |

表 4 规划目标情景下的规模与结构  
Table 4 Scale and structure in PO scenario

| 项目          | 2020 年 |        | 2025 年 |        | 2035 年 |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     |
| 总人口规模(万人)   | 1.606  | 2.068  | 2.100  | 2.350  | 2.388  | 2.698  |
| 农牧民人口规模(万人) | 1.250  | 1.650  | 1.650  | 1.830  | 1.863  | 2.135  |
| 城镇人口规模(万人)  | 0.356  | 0.418  | 0.450  | 0.520  | 0.525  | 0.563  |
| 旅游规模(万人次)   | 3.564  | 4.113  | 4.200  | 4.700  | 4.776  | 5.396  |
| 家牦牛(羊单位)    | 287615 | 363303 | 302752 | 438991 | 378440 | 514679 |
| 藏羊(羊单位)     | 87156  | 110092 | 91743  | 133027 | 114679 | 155963 |
| 马(羊单位)      | 5229   | 6606   | 5504   | 7982   | 6881   | 9358   |
| 野生动物(羊单位)   | 35438  | 37048  | 44192  | 48035  | 56831  | 61210  |

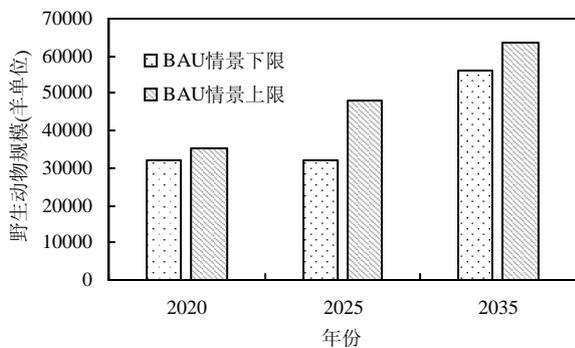


图 2 BAU 情景下野生动物规模  
Fig.2 Wildlife scale in BAU scenario

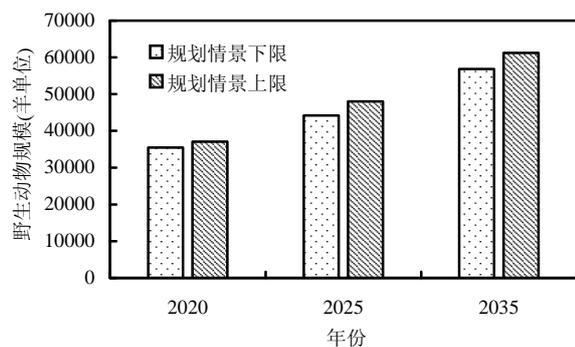


图 3 规划目标情景下野生动物规模  
Fig.3 Wildlife scale in PO scenario

在规划目标情景下,2020 年玛多县地区野生动物规模在 35438~37048 羊单位,2025 年规模为 44192~48035 羊单位,2035 年规模为 56831~61210 羊单位,在此情景下能保证野生动物种群数量发展的同时畜牧业发展相对较为迅速.

2.4.2 区域畜牧业结构与规模分析 在玛多县畜牧业发展规划中,产业种类以牛、羊、马为主.近年来,随着产业结构、企业组织结构、市场结构和产品结构的进一步调整,实施一系列改革发展战略,玛多县畜牧业已具备了一定的基础和实力,符合该地区工业发展规划定位.本研究根据相关文献数据及青海省统计年鉴并结合三江源国家公园规划以及玛多县统计资料及年鉴利用不确定多目标优化模型计算 BAU 情景和规划目标情景下 2020、2025 和 2035 年的畜牧业载畜规模(图 4~图 9).由图可看出,玛多县地区以养殖家牦牛为主,藏羊次之,马的养殖规模最小.其中,在 BAU 情景下,2020 年家牦牛、藏羊、马的载畜规模分别为 246138~389037 羊单位、74587~117890 羊单位、4475~7073 羊单位,2025 年

分别达到 258905~458972 羊单位、78456~139083 羊单位、4707~8345 羊单位,2035 年分别达到 278432~558426 羊单位、84373~169220 羊单位、5062~10153 羊单位,在此情景下地区畜牧业发展缓慢,距离发展目标较远.在规划目标情景下,2020 年玛多县地区畜牧业家牦牛、藏羊、马的载畜规模最大分别达到 287615~363303 羊单位、87156~11092 羊单位、5229~6606 羊单位,2025 年分别达到 302752~438991 羊单位、91743~133027 羊单位、5504~7982 羊单位,2035 年分别达到 378440~514679 羊单位、114679~155963 羊单位、6881~9358 羊单位,在此情景下畜牧业发展相对较为迅速.与 BAU 情景相比,规划目标情景下玛多县畜禽养殖规模更合理.

2019 年总人口接近 1.60 万人,因此,规划目标情景的人口规模比较合理,符合规划人口目标.进一步对牧民人口规模进行分析,由图 12-图 13 可以看出,在 BAU 情景下,

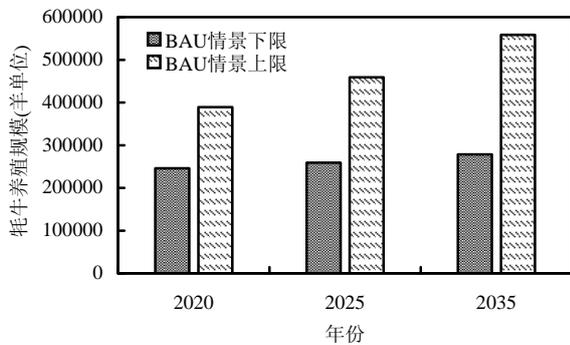


图 4 BAU 情景下牦牛养殖规模  
Fig.4 Yak breeding scale in BAU scenario

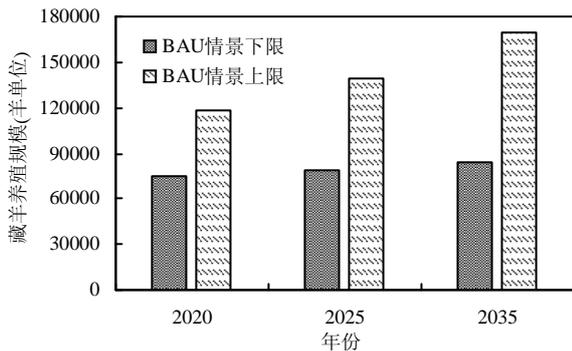


图 5 BAU 情景下藏羊养殖规模  
Fig.5 Tibetan sheep breeding scale in BAU scenario

2.4.3 区域人口规模分析 由图 10~图 11 可看出,在 BAU 情景下,玛多县 2020 年人口规模为 1.975~2.705 万人,2025 年为 2.164~3.443 万人,2035 年为 2.329~3.75 万人;而在规划目标情景下,2020 年、2025 年和 2035 年人口规模区间分别为 1.606~2.068 万人、2.100~2.350 万人和 2.388~2.698 万人,而玛多县

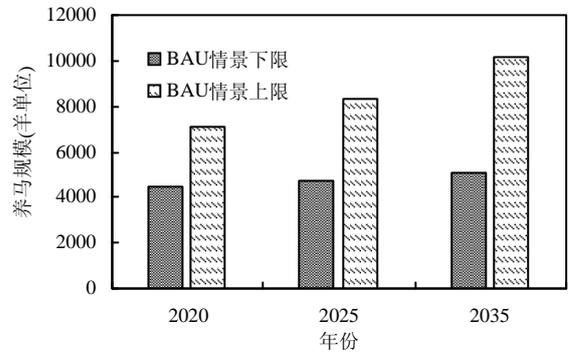


图 6 BAU 情景下养马规模  
Fig.6 Raising horses scale in BAU scenario

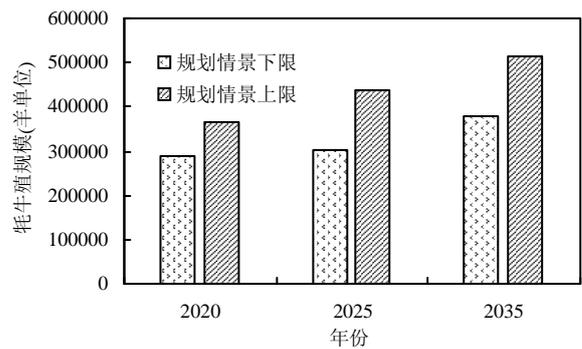


图 7 规划目标情景下牦牛养殖规模  
Fig.7 Yak breeding scale in PO scenario

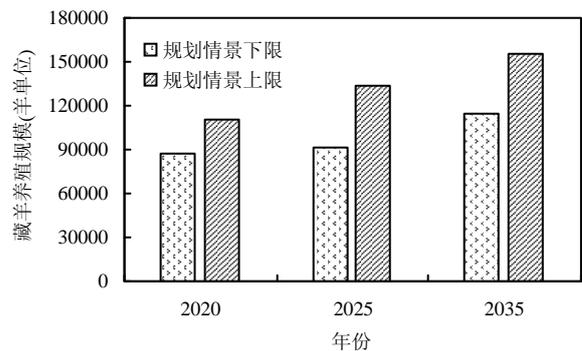


图 8 规划目标情景下藏羊养殖规模  
Fig.8 Tibetan sheep breeding scale in PO scenario

2020 年牧民人口规模为 1.525~2.202 万人,2025 年为 1.740~2.836 人,2035 年为 1.852~3.135 万人;在规划目标情景下,2020 年、2025 年和 2035 年牧民人口规模区间分别为 1.25~1.65 万人、1.65~1.83 万人

和 1.863~2.135 万人,玛多县 2019 年牧民人口为 1.26 万人,因此,规划目标情景下的牧民人口规模比较合理,符合规划人口目标。

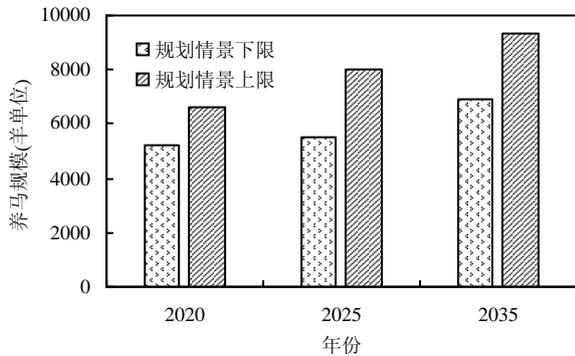


图 9 规划目标情景下养马规模

Fig.9 Raising horses scale in PO scenario

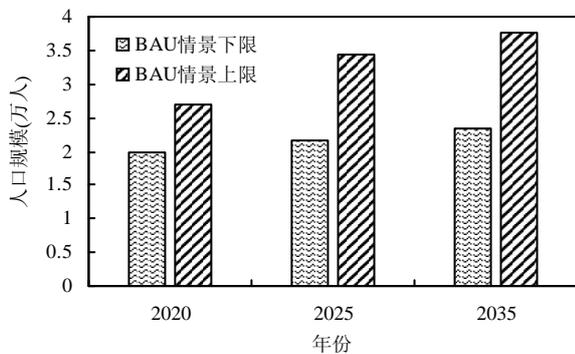


图 10 BAU 情景下总人口规模

Fig.10 Total population scale in BAU scenario

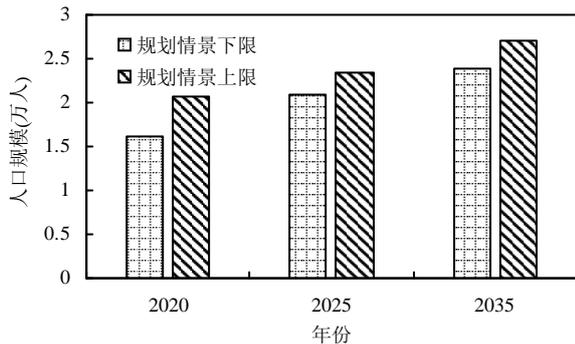


图 11 规划目标情景下总人口规模

Fig.11 Total population scale in PO scenario

2.4.4 区域旅游规模分析 旅游业是三江源地区一个重要产业.近几年,玛多县旅游产业发展迅速,截至 2018 年旅游产业带来的总收入达到 3525 万元,接待游客人数 4.89 万人次,旅游业的发展带动了相关产业和地方经济的发展,加快了城乡经济结构调整的步伐,扩大了社会就业,增加了城镇居民和农牧

民群众收进.旅游业的产业带动和社会效益已在显现.但随着人们对黄河源生态保护意识的逐渐增强,地方政府也为有效保护三江源国家公园黄河源园区扎陵-鄂陵湖、星星海自然保护分区的生态环境和自然资源,玛多县政府通告,禁止在扎陵-鄂陵湖、星星海自然保护分区开展旅游活动,旨在保护黄河源头生物多样性,确保珍稀物种栖息地不受威胁,有效保护好黄河源头的生态环境.因此,本研究对不同情景下玛多县旅游规模进行分析,由图 14 和图 15 可看出,在 BAU 情景下,玛多县旅游规模整体呈现增加趋势,2020 年玛多县地区旅游规模为 7.899~9.017 万人次,2025 年达到 8.656~11.445 万人次,2035 年达到 9.716~12.533 万人次,在此情景下旅游业发展迅速发展,但未能考虑地区生物多样性以及地方发展规划,旅游规模持续增加.而在规划目标情景下,2020 年玛多县地区旅游规模最大为 4.113 万人次,2025 年为 4.700 万人次,2035 年为 5.396 万人次,在此情景下旅游业发展减缓,主要是考虑了三江源国家公园规划试点以及地方规划对旅游的限制开发,旨在保护地方生物多样性以及生态环境。

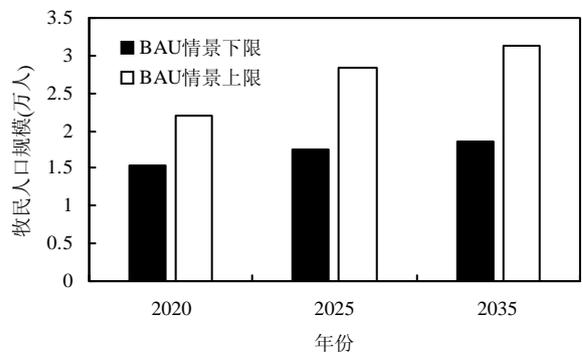


图 12 BAU 情景下牧民人口规模

Fig.12 Population scale of herdsmen in BAU scenario

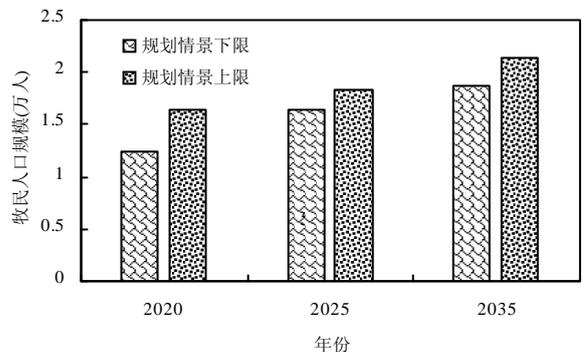


图 13 规划目标情景下牧民人口规模

Fig.13 Population scale of herdsmen in PO scenario

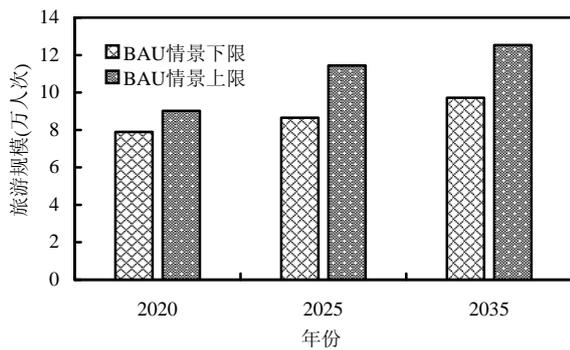


图 14 BAU 情景下玛多县旅游规模

Fig.14 Tourism scale of Maduo County in BAU scenario

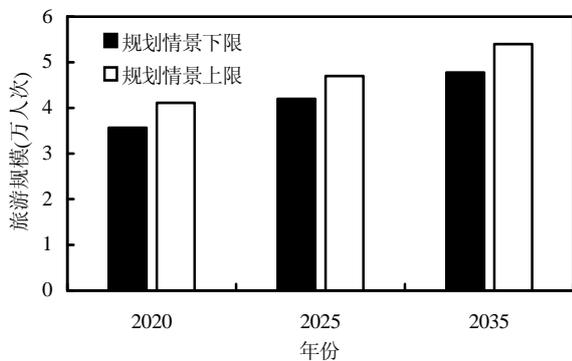


图 15 规划目标情景下玛多县旅游规模

Fig.15 Tourism scale of Maduo County in PO scenario

### 3 结论

3.1 综合考虑保护地综合生态承载力及其相关的发展因子与限制因子,利用不确定性多目标规划方法建立一种区域生态承载力不确定性多目标优化模型得到的结果(包括适度人口与载畜规模)相比传统方法得到的结果更接近实际情况。

3.2 草畜矛盾是制约玛多县社会经济发展的瓶颈;根据《三江源国家公园总体规划》,在保证野生动物种群数量发展的同时,2020年、2025年和2035年玛多县地区畜牧业(家牦牛、藏羊、马)规模分别为287615~363303羊单位、87156~11092羊单位、5229~6606羊单位,2025年分别达到302752~438991羊单位、91743~133027羊单位、5504~7982羊单位,2035年分别达到378440~514679羊单位、114679~155963羊单位、6881~9358羊单位。

3.3 由于保护地生态环境容量的限制,为持续推进“三江源国家公园试点”目标,黄河源区玛多县需控制其人口与旅游规模。其中2020年、2025年和2035

年牧民人口规模区间分别为1.25~1.65万人、1.65~1.83万人和1.863~2.135万人。2020年玛多县地区旅游规模最大为4.113万人次,2025年为4.700万人次,2035年为5.396万人次,在规划目标情景下旅游业发展减缓,主要是考虑了三江源国家公园规划试点以及地方规划对旅游的限制开发,旨在保护地方生物多样性以及生态环境。

### 参考文献:

- [1] 张丽荣,孟锐,潘哲,等.生态保护地空间重叠与发展冲突问题研究[J].生态学报,2019,39(4):1351-1360.  
Zhang L R, Meng R, Pan Z, et al. Research on the space-overlap and development conflicts between types of protected areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(4):1351-1360.
- [2] 付梦婷,田俊量,朱彦鹏,等.三江源国家公园功能分区与目标管理[J].生物多样性,2017,25(1):71-79.  
Fu M D, Tian J L, Zhu Y P, et al. Identification of functional zones and methods of target management in Sanjiangyuan National Park [J]. Biodiversity Science, 2017,25(1):71-79.
- [3] 侯鹏,杨旻,翟俊,等.论自然保护地与国家生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):420-428.  
Hou P, Yang M, Zhai J, et al. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern [J]. Geographical Research, 2017,36(3):420-428.
- [4] 杨锐,曹越.论中国自然保护地的远景规模[J].中国园林,2018,34(7):5-12.  
Yang R, Cao Y. Discussion on the long-term target of protected area coverage in China [J]. Chinese Landscape Architecture, 2018,34(7):5-12.
- [5] 王焱.自然保护地生态承载力时序变化及驱动因素分析[J].国土与自然资源研究,2019,(6):58-59.  
Wang Y. Time series change and driving factors analysis of ecological carrying capacity of protected areas [J]. Territory & Natural Resources Study, 2019,(6):58-59.
- [6] 彭琳,赵智聪,杨锐.中国自然保护地体制问题分析与应对[J].中国园林,2017,(4):108-113.  
Peng L, Zhao Z C, Yang R. Analysis on the problems of protected area system in China and the countermeasure [J]. Chinese Landscape Architecture, 2017,(4):108-113.
- [7] 陈吉宁.国务院关于自然保护区建设和管理工作情况的报告[EB/OL]. [2018-05-20]. [http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2016-07/01/content\\_1992679.htm](http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2016-07/01/content_1992679.htm).  
Chen J N. Report of the state council on the construction and management of nature reserves [EB/OL]. [2018-05-20]. [http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2016-07/01/content\\_1992679.htm](http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2016-07/01/content_1992679.htm).
- [8] 环境保护部.中国生物多样性保护战略与行动计划(2011~2030年)[M].北京:中国环境科学出版社,2011.  
Ministry of Environmental Protection. China's Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011~2030) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [9] Yue D X, Xu X F, Li Z Z, et al. Spatiotemporal analysis of ecological footprint and biological capacity of Gansu, China 1991~2015: down from the environmental cliff [J]. Ecological Economics, 2006,58(2):393-406.
- [10] 魏晓旭,颜长珍.生态承载力评价方法研究进展[J].地球环境学报,2019,10(5):441-452.  
Wei X X, Yan C Z. Research and model application in ecological carrying capacity [J]. Journal of Earth Environment, 2019,10(5):441-452.

- [11] 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.  
Gao J X. Exploration of sustainable development theory: Theory, method and application of ecological carrying capacity [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [12] 张明, 徐德琳, 游广永. 巴音布鲁克国家级高寒草原湿地保护区生态承载力与可持续发展研究 [J]. 生物灾害科学, 2018, 41(2): 101-107.  
Zhang M, Xu D L, You G Y. Ecological carrying capacity and sustainable development of grassland and wetland in Bayanbulak National Alpine Grassland Nature Reserve [J]. Biological Disaster Science, 2018, 41(2): 101-107.
- [13] 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 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 1-9.  
Liu M H, Xi J C, Chen S H. Ecological carrying capacity accounting model and application in multi-type protected areas. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 1-9.
- [14] 曾维华, 杨月梅. 环境承载力不确定性多目标优化模型及其应用——以北京市通州区区域战略环境影响评价为例 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 667-672.  
Zeng W H, Yang Y M. Environmental carrying capacity uncertain type multi-objective optimum model—Using regional strategic EIA on Tongzhou District, Beijing City as example [J]. China Environmental Science, 2008, 28(7): 667-672.
- [15] 向芸芸, 蒙吉军. 生态承载力研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2958-2965.  
Xiang Y Y, Meng J J. Research and application advances in ecological carrying capacity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2958-2965.
- [16] 曾维华, 王华东, 薛纪渝, 等. 人口、资源与环境协调发展关键问题之一——环境承载力研究 [J]. 中国人口、资源与环境, 1991, (2): 33-37.  
Zeng W H, Wang H D, Xue J Y, et al. Environmental carrying capacity: A key to the population [J]. China Population, Resources and Environment, 1991, (2): 33-37.
- [17] 石月珍, 赵洪杰. 生态承载力定量评价方法的研究进展 [J]. 人民黄河, 2005, 27(3): 6-8.  
Shi Y Z, Zhao H J. Research progress of quantitative evaluation method of ecological carrying capacity [J]. Yellow River, 2005, 27(3): 6-8.
- [18] 王文懿. 基于系统动力学-不确定多目标优化整合模型的区域环境承载力研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2015.  
Wang W Y. Regional environmental carrying capacity study based on the system dynamic-inexact fuzzy multi-objective model [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2015.
- [19] Ahmadi P, Dincer I, Rosen M A. Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 282-300.
- [20] Kaviri A G, Jaafar M N M, Lazim T M, et al. Exergoenvironmental optimization of heat recovery steam generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 67: 27-33.
- [21] Wu Z, Xu J. Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics-fuzzy multiple objective programming in world heritage areas [J]. Energy, 2013, 49: 19-31.
- [22] Huang B, Hu Z, Liu Q. Optimal allocation model of river emission rights based on water environment capacity limits [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(13-15): 2778-2785.
- [23] Lv Y, Huang G H, Li Y P, et al. Managing water resources system in a mixed inexact environment using superiority and inferiority measures [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(5): 681-693.
- [24] Chiang L, Chaubey I, Maringanti C, et al. Comparing the selection and placement of best management practices in improving water quality using a multiobjective optimization and targeting method [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(3): 2992-3014.
- [25] Xi B D, Su J, Huang G H, et al. An integrated optimization approach and multi-criteria decision analysis for supporting the waste-management system of the city of Beijing, China [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(4): 620-631.
- [26] Shahnazari-Shahrezaei P, Tavakkoli-Moghaddam R, Kazemipoor H. Solving a multi-objective multi-skilled manpower scheduling model by a fuzzy goal programming approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(7): 5424-5443.
- [27] Sabri E H, Beamon B M. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design [J]. Omega-International Journal of Management Science, 2000, 28(5): 581-598.
- [28] Gu J J, Guo P, Huang G H, et al. Optimization of the industrial structure facing sustainable development in resource-based city subjected to water resources under uncertainty [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(3): 659-673.
- [29] Huang G H. IPWM: An interval parameter water quality management model [J]. Engineering Optimization, 1996, 26(2): 79-103.
- [30] Wang L, Meng W, Guo H, et al. An interval fuzzy multiobjective watershed management model for the Lake Qionghai watershed, China [J]. Water Resources Management, 2006, 20(5): 701-721.
- [31] Zou R, Guo H C, Chen B. A multiobjective approach for integrated environmental economic planning under uncertainty [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2000, 17(4): 267-291.
- [32] Zhou M, Chen Q, Cai Y L. Optimizing the industrial structure of a watershed in association with economic-environmental consideration: an inexact fuzzy multi-objective programming model [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 42: 116-131.
- [33] Li Y F, Li Y P, Huang G H, et al. Modeling for environmental-economic management systems under uncertainty [Z]. International Conference on Ecological Informatics and Ecosystem Conservation, 2010.
- [34] 朱夫静. 基于遥感模型的三江源区合理牧业人口规模测算 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.  
Zhu F J. Proper herdsmen population calculated based on remote sensing model in the Three-River Headwaters Region [D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2016.
- [35] 杨帆, 邵全琴, 郭兴健, 等. 玛多县大型野生食草动物种群数量对草畜平衡的影响研究 [J]. 草业学报, 2018, 27(7): 1-13.  
Yang F, Shao Q Q, Guo X J, et al. Effects of wild large herbivore populations on the grassland-livestock balance in Maduo County [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(7): 1-13.
- [36] 郑飞鸽, 易桂花, 张廷斌, 等. 三江源植被碳利用率动态变化及其对气候响应 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 401-413.  
Zheng F G, Yi G H, Zhang T B, et al. Study on spatio-temporal dynamics of vegetation carbon use efficiency and its response to climate factors in Three-River Headwaters Region [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 401-413.
- [37] 王斌, 李洁, 姜微微, 等. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的影响及其原因 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(10): 1764-1771.  
Wang B, Li J, Jiang W W, et al. Impacts of the rangeland degradation on CO<sub>2</sub> flux and the underlying mechanisms in the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. China Environmental Science, 2012, 32(10): 1764-1771.

**作者简介:** 王慧慧(1989-), 男, 安徽枞阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境与生态管理, 资源管理与政策, 节能减排与低碳技术研究. 发表论文 18 篇.