

DOI: 10.20103/j.stxb.202109162613

毛爱涵, 李发祥, 杨思源, 于德永. 三江源地区环境足迹及居民福祉的动态变化特征评价. 生态学报, 2023, 43(18): 7637-7650.

Mao A H, Li F X, Yang S Y, Yu D Y. Evaluation on the dynamic features of environmental footprint and human well-being in the Three-River Headwaters region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7637-7650.

# 三江源地区环境足迹及居民福祉的动态变化特征评价

毛爱涵<sup>1</sup>, 李发祥<sup>2</sup>, 杨思源<sup>2</sup>, 于德永<sup>1,3,4,\*</sup>

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 三江源国家公园管理局, 西宁 810001

3 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810016

4 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

**摘要:** 环境足迹表征人类发展过程对环境的影响程度。环境足迹和居民福祉水平是衡量区域可持续发展能力的重要指标。计算了 2000—2018 年三江源地区的环境足迹与环境边界, 构建了三江源地区居民福祉评价框架, 评估了 2000—2018 年三江源地区环境足迹及居民福祉的耦合协调关系及动态变化特征, 得到了 2000—2018 年三江源地区环境足迹与居民福祉间的定量关系, 可为有关部门制定合理的区域发展策略提供科学支撑。结果表明: (1) 2000—2018 年三江源地区人均环境足迹呈一直超过环境边界限额的状态。(2) 三江源地区居民福祉按重要性排序表现为社会文化福祉高于安全健康福祉和基本需求福祉。2000—2018 年, 三江源地区居民福祉总体呈波动式上升趋势, 其中安全与健康福祉的波动最大且对居民福祉的贡献度最高。(3) 三江源地区环境足迹与居民福祉的耦合度与耦合协调度呈现波动上升趋势, 二者关联水平逐渐提高, 逐步趋于协调发展。

**关键词:** 环境足迹; 居民福祉; 耦合度; 耦合协调度; 三江源地区

## Evaluation on the dynamic features of environmental footprint and human well-being in the Three-River Headwaters region

MAO Aihan<sup>1</sup>, LI Faxiang<sup>2</sup>, YANG Siyuan<sup>2</sup>, YU Deyong<sup>1,3,4,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Three-River-Source National Park Administration, Xining 810001, China

3 Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Xining 810016, China

4 Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810016, China

**Abstract:** Environmental footprint represents the degree of the impact of human development on the environment. Environmental footprint and human well-being are the important indicators to measure the sustainable development capacity of a region. This paper calculated the environmental footprint and environmental boundary of the Three-River Headwaters region, constructed a framework for evaluating human well-being in the Three-River Headwaters region, and evaluated the coupling coordination relationship and the dynamic characteristics of the environmental footprint and human well-being in the Three-River Headwaters region from 2000 to 2018. The quantitative relationship between the environmental footprint and human well-being in the Three-River Headwaters region was obtained. The results indicated that: (1) overall, the environmental footprint per capita of the Three River Headwaters region from 2000 to 2018 exceeded the environmental boundary limit. (2) Human well-being in the Three River Headwaters region indicated that social and cultural well-being was higher than safety, health, and basic needs in the order of importance. From 2000 to 2018, the overall human well-

**基金项目:** 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1001); 青海省科技厅项目(2021-SF-A7-1, 2022ZY024); 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室项目(2022-TS-07)

**收稿日期:** 2021-09-16; **网络出版日期:** 2023-05-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ydy@bnu.edu.cn

being in the Three-River Headwaters region showed a fluctuating upward trend, of which safety and health fluctuated the most and contributed the most to the overall human well-being. (3) The coupling degree and coupling coordination degree between the environmental footprint and human well-being in the Three River Headwaters region showed a fluctuating upward trend, and the level of correlation between the two gradually increased, and gradually tended to be coordinated. The results of this study can provide scientific support for the relevant departments to formulate reasonable regional development strategies.

**Key Words:** environmental footprint; human well-being; coupling degree; coupling coordination degree; the Three-River Headwaters region

近几十年来,在全球范围内人口增长、经济发展和人们生活方式改变的驱动下,自然资源消耗迅速增加,并导致了严重的环境退化<sup>[1-3]</sup>。因此,国际可持续发展研究领域出现 2 个热点概念,分别是足迹家族和行星边界,用以衡量环境可持续发展情况。足迹家族属于现状指标,指人类在自然资源消费和废弃物排放过程中占用的地球生态系统的再生和消纳能力<sup>[4,5]</sup>。行星边界属于临界指标,是指可供人类安全占用的地球生态系统的最大再生和消纳能力,是维持系统结构与功能基本稳定的临界阈值。该框架提出了九个相互关联的地球尺度的生物物理边界,并表明如果要避免对人类造成灾难性后果,全球应该保持在这些边界之内<sup>[6]</sup>。相关研究者从不同角度对足迹家族展开研究,如:提出了一系列社会和经济类足迹指标研究环境可持续性<sup>[7]</sup>;比较了生态足迹、碳足迹、水足迹与能源足迹的概念和计算方法异同,并分析了整合 4 种足迹评估的潜在优势及障碍<sup>[8]</sup>;提出了最大可持续足迹的概念,为科学评估人类活动背景下的环境可持续性提供了参考依据<sup>[9]</sup>。由于资源分布的异质性和人类的影响,有学者指出即使全球环境变量可能保持在安全范围内,但区域环境边界可能已经超过安全范围<sup>[10]</sup>,因此需要划定特定区域的环境边界开展相关研究,如:在国家尺度确定每个行星边界变量的对应变量<sup>[11]</sup>;对于以混合压力因素为特征的过程,如气候变化、海洋酸化和平流层臭氧耗竭,这些分析采用全球极限的线性降尺度法来确定人均份额<sup>[7,12-13]</sup>。足迹家族和行星边界概念各有优势,具备很强的互补性。一方面,足迹家族已形成了一套规范化的指标核算方法,可以克服专家知识可能导致的主观性、模糊性和不确定性,可以较为准确的评估行星边界;另一方面,行星边界评估有助于克服一些环境足迹缺乏相应承载力或承载力指标权威性不足的问题。

人类福祉概念将多元的数据整合在一起,可有效地补充 GDP 等经济指标的局限性,为社会发展和政策制定提供依据<sup>[14]</sup>。早期人类福祉研究的侧重点主要是人类福祉的内涵与意义,如“应在提高居民的幸福感和生活满意度的基础上推动社会发展”<sup>[15]</sup>、“为个人创造能最大限度发挥其全部潜力的条件,是人类社会发展的最终目的”<sup>[16]</sup>等。后来社会学、心理学等领域的学者也对人类福祉概念框架进行了相关研究,如,马斯洛的需求层次理论<sup>[17]</sup>、亚里士多德时期的 Eudaimonia 主义<sup>[18]</sup>等。当前国际上关于人类福祉的研究热点主要集中在建立概念和评估框架,利用评估指数或指标体系评估福祉水平等,如:从马斯洛的需求层级理论出发,把人类福祉分为三个层面,分别是福祉构建、福祉维护与福祉改善<sup>[17]</sup>;分析主观福祉与客观福祉的显著性相关关系<sup>[19]</sup>;将人类福祉分解为物质、经济等方面的客观需求以及幸福感、满足感等方面的主观需求<sup>[20]</sup>。资源环境会约束经济增长,进而影响民生福祉的转化效率,导致居民的福祉需求无法得到满足,出现低质量发展的问题<sup>[21,22]</sup>,相关学者将研究重心放在“如何促进经济-福祉-环境的协调同步发展”上<sup>[23]</sup>。因此探讨人类福祉和环境足迹的相互影响,既要把握历史变化趋势规律,也要预测未来人类福祉和环境的状况,从而全面系统地对环境足迹与人类福祉进行科学研究。

三江源国家生态保护综合试验区(简称三江源地区)地处青藏高原腹地,是我国青藏高原生态安全屏障的重要组成部分,在全国生态文明建设中具有特殊重要地位,关系到全国的生态安全和中华民族的长远发展。三江源地区资源、环境、经济、社会 and 可持续发展之间的关系错综复杂且矛盾日益突出,实施有效的政策管理与调控已成为经济、社会和环境可持续发展的关键。本文以可获取的社会经济与自然资源数据为基础,计算

2000—2018 年三江源地区环境足迹与边界;构建三江源地区居民福祉评价体系,量化居民福祉水平并探讨其变化趋势;采用耦合度与耦合协调度模型对三江源地区 2000—2018 年环境足迹与居民福祉之间的协调关系进行定量检验,分析环境足迹与居民福祉之间的协调发展程度及动态变化特征。

## 1 研究区概况

三江源地区位于青海省南部,平均海拔 3500—4800m,是世界屋脊——青藏高原的腹地,是孕育中华民族、中南半岛悠久文明历史的世界著名江河,是长江、黄河和澜沧江的源头汇水区。地理坐标为北纬 31°39′—36°16′,东经 89°24′—102°23′,行政区域包含玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、黄南藏族自治州、海南藏族自治州,总面积达 39.5 万 km<sup>2</sup>,约占青海省总面积的 43%。三江源地区地貌类型以山地地貌为主,中西部 and 北部呈平原状,内有巴颜喀拉山、东昆仑山及其支脉阿尼玛卿山和唐古拉山脉。气候为典型的高原大陆性气候,属青藏高原气候系统,年温差小,日照时间长,无四季区分,干湿两季分明,日温差大,辐射强烈。

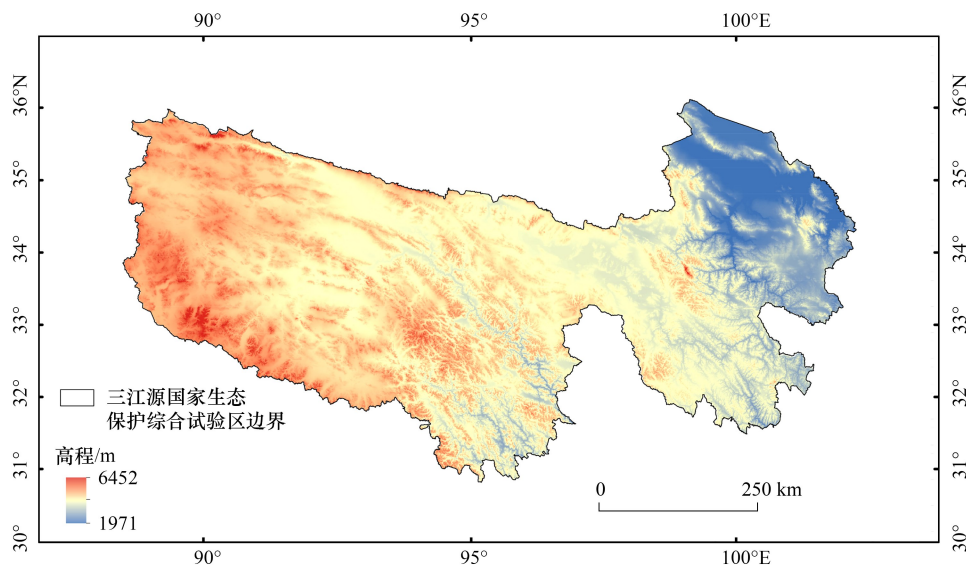


图 1 三江源国家生态保护综合试验区

Fig.1 Location of the Three-River Headwaters region

## 2 研究方法

### 2.1 环境足迹计算

#### 2.1.1 碳足迹

采用 IPCC 法来计算碳足迹,主要是依据 2006 版《IPCC 国家温室气体清单指南》中所列举的清单编制的基本方法,计算方法如公式(1):

$$CF = \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot O_i \cdot \frac{44}{12} \quad (1)$$

其中,CF 是碳足迹总量; $i$  为第  $i$  类消费项目; $C_i$  是指第  $i$  类能源的消费; $F_i$  指第  $i$  类能源的碳排放系数(如表 1); $O_i$  代表碳氧化因子,即碳被氧化的比例,通常该因子取值为 1,表示碳被完全氧化;44/12 即 CO<sub>2</sub> 和 C 的分子量比率。各类能源的消费量来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》。

#### 2.1.2 水足迹

区域水足迹定义为系统边界内消耗和污染的淡水总量,包括直接用水量和间接虚拟水流量(即以产品和服务的形式)。根据水足迹评估手册<sup>[24]</sup>,采用自上而下的方法进行核算,区域水足迹按照内部水足迹和外部

水足迹计算,计算方法如公式(2):

$$WF = WF_{\text{area}} + WF_{\text{external}} \quad (2)$$

其中,  $WF_{\text{area}}$  表示区域内部水资源利用和污染过程产生的水足迹,  $WF_{\text{external}}$  为外部水足迹。

表 1 各类能源的碳排放系数/(kgC/GJ)

Table 1 Carbon emission coefficients of all kinds of energy sources

| 种类<br>Type                           | 原煤<br>Raw coal | 焦炭<br>Coke | 原油<br>Crude | 燃料油<br>Fuel oil | 汽油<br>Gasoline | 煤油<br>Kerosene | 柴油<br>Diesel fuel | 液化石油气<br>Liquefied petroleum gas |
|--------------------------------------|----------------|------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------------------------|
| 碳排放系数<br>Carbon emission coefficient | 25.8           | 29.2       | 20          | 18.9            | 19.6           | 20.2           | 22.1              | 17.2                             |

(1) 内部水足迹等于该地区的水资源总消费量减去该地区出口到其他地区的虚拟水量, 内部水足迹的计算方法如公式(3):

$$WF_{\text{area}} = W_a + W_i + W_l + W_e - WF_{\text{vir-ex}} \quad (3)$$

其中,  $W_a$  指该地区的农业生产耗水量,  $W_i$  是该地区的工业生产用水量,  $W_l$  为该地区的居民生活用水量,  $W_e$  代表该地区的生态环境耗水量,  $WF_{\text{vir-ex}}$  表示该地区出口的虚拟水量。

(2) 外部水足迹是该地区进口的虚拟水量除去进口后经过加工再出口的虚拟水量, 计算方法如公式(4):

$$WF_{\text{external}} = WF_{\text{vir-i}} - WF_{\text{vir-re-ex}} \quad (4)$$

其中,  $WF_{\text{vir-i}}$  是该地区进口的虚拟水量,  $WF_{\text{vir-re-ex}}$  是该地区进口再出口的虚拟水量。用水量相关数据来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》。

### 2.1.3 生态足迹

生态足迹是指提供特定活动所需的具有生态生产力的土地和水的数量<sup>[25]</sup>。本文按照国家足迹账户(NFA)计算方法计算生态足迹和土地足迹<sup>[26]</sup>。生态足迹账户由六种生物生产性土地类别构成, 进一步分为三类:

(1) 可再生的生物资源类土地(即耕地、牧场、林地和渔场), 计算方法如公式(5):

$$EF_r = \sum_{j=1}^4 (Q_j \cdot \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{M \cdot EQ_{ij}}) \quad (5)$$

其中,  $j$  为四种可再生资源土地,  $Q_j$  为等价因子,  $N$  为产品数量,  $C_i$  为产品的总需求量,  $M$  为当地人口数量,  $EQ_{ij}$  为第  $j$  类土地提供的第  $i$  类产品的当地生物产量;

(2) 人为基础设施占用的土地, 按  $EF_b = A \times Q \times Y$  计算(其中  $A$  为人均建筑面积,  $Q$  为建设用地的等量系数,  $Y$  为建设用地产量系数);

(3) 能源类土地足迹, 化石燃料消耗以及吸纳二氧化碳所用的土地。

总生态足迹是各类土地的人均占用面积与总人口的乘积。

土地利用数据、生物产量、人口数量来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》。

### 2.1.4 氮足迹

根据已有研究发现, 食物氮在总氮足迹中占有的平均比例为 79.5%<sup>[27]</sup>, 本文主要计算食物消费氮足迹( $NF_{\text{con}}$ )和食物生产氮足迹( $NF_{\text{pro}}$ ), 计算方法如公式(6):

$$NF = NF_{\text{con}} + NF_{\text{pro}} \quad (6)$$

食物消费氮足迹指由食物消费摄入成年人体内的氮素, 最终以粪尿氮的形式经各种渠道最终排入环境中<sup>[28]</sup>, 其中参与食物消费的食物主要有粮食、蔬菜、瓜果、畜肉、禽肉、水产品、蛋类、奶类。食物生产氮足迹主要指虚拟氮, 包括农田氮肥施用、畜禽喂养和食物处理加工过程中损失的氮<sup>[29]</sup>。为了明确界限和避免重复计算, 虚拟氮的计算一般不包括食物生产过程中涉及的能源消耗所产生的氮流失, 而是把这部分流失的氮归于能源氮足迹分开计算<sup>[28]</sup>。本文虚拟氮不包括食物生产、处理和运输过程中因能源消耗而排放的氮素。因此,



可以利用各种食物的虚拟氮与消费氮之间的关系,将虚拟氮因子与食物消费氮足迹相乘,结合氮肥施用量等数据求出食物生产氮足迹。食物消费量数据来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》。不同食物的氮含量及虚拟因子如表 2。

表 2 不同食物的氮含量与虚拟氮因子

Table 2 Nitrogen content of different foods and virtual nitrogen factor

| 种类<br>Type                    | 粮食<br>Grain | 蔬菜<br>Vegetables | 瓜果<br>Melons and<br>fruits | 畜肉类<br>Livestock<br>meat | 禽肉类<br>Poultry<br>meat | 水产品<br>Aquatic<br>products | 蛋类<br>Eggs | 奶类<br>Milk |
|-------------------------------|-------------|------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|------------|------------|
| 氮含量 Nitrogen content (g/kg)   | 14.4        | 1.76             | 1.6                        | 29.22                    | 29.9                   | 28.77                      | 20.48      | 5.28       |
| 虚拟氮因子 Virtual nitrogen factor | 1.4         | 10.6             | 10.6                       | 4.7                      | 3.4                    | 3                          | 3.4        | 5.7        |

### 2.1.5 磷足迹

根据研究,城市家庭消费是磷在整个食物链循环的重要环节,三江源地区磷足迹主要考虑食物消费磷足迹( $PF_{con}$ )、食物生产磷足迹( $PF_{pro}$ ),计算方法如公式(7):

$$PF = PF_{con} + PF_{pro} \quad (7)$$

参与食物消费磷足迹的农产品有谷物、大豆类、蔬菜、水果、猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、水产品、蛋类、奶类,不同农产品的磷含量如表 3。

表 3 不同农产品磷含量/(g/kg)

Table 3 Phosphorus content of different agricultural products

| 种类<br>Type             | 谷物<br>Cereals | 大豆类<br>Soy | 蔬菜<br>Vegetables | 水果<br>Fruits | 猪肉<br>Pork | 牛肉<br>Beef | 羊肉<br>Mutton | 禽肉类<br>Poultry<br>meat | 水产品<br>Aquatic<br>products | 蛋类<br>Eggs | 奶类<br>Milk |
|------------------------|---------------|------------|------------------|--------------|------------|------------|--------------|------------------------|----------------------------|------------|------------|
| 磷含量 Phosphorus content | 3.14          | 6.05       | 0.63             | 0.25         | 5.6        | 2.1        | 1.6          | 1.5                    | 2.56                       | 2.6        | 0.93       |

食物生产磷足迹主要包括生产加工食物的磷排放量( $P_{p-food}$ )、农田土壤磷累积量( $P_{acc}$ )和畜牧粪便磷排放量( $P_{fae}$ )、化肥使用量( $P_{fer}$ )、化肥生产磷排放量( $P_{p-fer}$ ),计算方法如公式(8)—(12):

$$PF_{pro} = P_{p-food} + P_{acc} + P_{fae} + P_{fer} + P_{p-fer} \quad (8)$$

$$P_{p-food} = P_{food} \cdot k_1 \quad (9)$$

$$P_{acc} = P_{crop} \cdot k_2 \quad (10)$$

$$P_{fae} = P_{ani} \cdot k_3 \quad (11)$$

$$P_{p-fer} = P_{fer} \cdot k_4 \quad (12)$$

其中, $P_{food}$ 为食物生产量, $P_{crop}$ 为植物类食物生产量, $P_{ani}$ 为动物类食物生产量, $k_1 = 0.36$ , $k_2 = 4.15$ , $k_3 = 18$ , $k_4 = 0.15$ <sup>[30]</sup>。食物消费量数据来自 2000—2018 年《青海省统计年鉴》。

## 2.2 环境边界

全球行星边界的份额可以降尺度到区域尺度上。具体地,基于已建立的全球阈值<sup>[2]</sup>和其它全球评估报告(如 IPCC),计算全球环境足迹的界限。使用“人均等分”的分配机制<sup>[13]</sup>,并且基于可持续发展的原则,即过去、现在和未来的人口拥有相似的资源权利,将全球足迹界限降尺度到各区域的足迹界限,计算方法如公式(13):

$$Lu_j = \frac{Pu_j}{Pw_j} \cdot Lw_j \quad (13)$$

其中, $Lu_j$ 和 $Lw_j$ 分别是第 $j$ 年的区域和全球足迹界限,而 $Pu_j$ 和 $Pw_j$ 分别为 $j$ 年的区域和全球人口数量。

## 2.3 三江源地区居民福祉水平计算

### 2.3.1 居民福祉评价指标体系构建

本文综合了联合国千年生态系统评估的人类福祉体系和马斯洛需求层次理论,考虑到人类福祉具有多维

特征,将三江源地区居民福祉体系划分为基本物质福祉、安全健康福祉、社会文化福祉 3 个层次,结合数据的可获取性,建立三江源地区居民福祉评价体系。

居民福祉指标体系分为基本物质福祉、安全健康福祉、社会文化福祉 3 个一级指标(表 4),其中基本需求福祉包括基本收入和基本物质 2 个二级指标以及生产总值、农村人均可支配收入、粮食总产量等 7 个三级指标;安全健康福祉包括身体健康和安全 2 个二级指标及卫生机构数、病床数、安全事故死亡人数等 4 个三级指标;社会文化福祉包括良好的社会关系和文化教育 2 个二级指标以及养老保险参保人数、城镇登记失业率、注册在校学生数等 4 个三级指标,其中“+”代表正向指标,“-”代表负向指标。

表 4 三江源地区居民福祉评价指标体系

Table 4 Evaluation index system of human well-being in the Three-Rivers Headwaters region

| 要素层<br>Element layer                     | 准则层<br>Criterion layer | 指标层<br>Index layer      | 指标性质<br>Index nature |
|------------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 基本需求福祉<br>Basic needs well-being         | 基本收入                   | 生产总值/亿元                 | +                    |
|                                          |                        | 农村居民人均可支配收入/元           | +                    |
|                                          |                        | 城镇居民人均可支配收入/元           | +                    |
|                                          | 基本物质                   | 粮食总产量/t                 | +                    |
|                                          |                        | 肉类总产量/t                 | +                    |
|                                          |                        | 奶类总产量/t                 | +                    |
|                                          |                        | 农作物种植面积/hm <sup>2</sup> | +                    |
| 安全健康福祉<br>Safety and health well-being   | 身体健康                   | 卫生机构/个                  | +                    |
|                                          |                        | 病床数/张                   | +                    |
|                                          | 安全                     | 安全事故死亡人数/人              | -                    |
|                                          |                        | 交通事故事故/起                | -                    |
| 社会文化福祉<br>Social and cultural well-being | 良好的社会关系                | 养老保险参保人数/人              | +                    |
|                                          |                        | 医疗保险参保人数/人              | +                    |
|                                          |                        | 城镇登记失业率/%               | -                    |
|                                          | 文化教育                   | 注册在校学生数/人               | +                    |
|                                          |                        |                         |                      |

2.3.2 人类福祉评价指标体系权重计算

本文利用熵值法<sup>[31]</sup>对各种指标进行加权计算,通过对指标权重和熵值的计算,判定其随机、离散度,从而避免人为因素造成的偏差,进而达到客观、科学的评价目的。具体计算步骤如下:

(1) 根据原始数据建立评价矩阵

评价系统中有  $a$  个需评价方案,  $b$  项评价指数,评价初始矩阵建立如公式(14):

$$X = [X_{mn}]_{a \times b} \quad (0 \leq m \leq a, 0 \leq n \leq b) \tag{14}$$

其中,  $X_{mn}$  代表第  $m$  个样本的第  $n$  项评价指标。

(2) 数据标准化处理

对评估指标进行标准化处理,以消除量纲和数量级差异对评估结果的影响,如公式(15):

$$\bar{X}_{mn} = \frac{X_n - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \bar{X}_{mn} = \frac{X_{\max} - X_n}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{15}$$

其中,  $\bar{X}_{mn}$  为标准化值,  $X_n$  为第  $n$  项指标值,  $X_{\max}$  为指标最大值,  $X_{\min}$  为指标最小值,标准化公式选择取决于指标的正负特性。

计算指标权重、指标信息熵值与信息效用值建立数据权重矩阵  $Y_{mn}$ ,如公式(16):

$$Y_{mn} = \frac{\bar{X}_{mn}}{\sum_{m=1}^a \bar{X}_{mn}} \tag{16}$$

(3) 计算第  $n$  项指标的信息熵值  $D_n$ , 如公式(17):

$$D_n = \frac{-1}{\ln a} \sum_{m=1}^a (Y_{mn} \ln Y_{mn}) \quad (17)$$

计算信息效用值  $E_n$ , 如公式(18):

$$E_n = 1 - D_n \quad (18)$$

(4) 计算评价指标权重

计算第  $n$  项评价指标的权重  $W_n$ , 如公式(19):

$$W_n = \frac{E_n}{\sum_{m=1}^a E_n} \quad (19)$$

(5) 计算样本评价值

采用加权求和公式计算综合评价值  $F$ , 如公式(20):

$$F = \sum_{m=1}^b Y_{mn} W_{mn} \quad (20)$$

## 2.4 三江源地区环境足迹与居民福祉的耦合关系分析

### 2.4.1 耦合度与耦合协调度模型

环境足迹与居民福祉之间的相互作用程度利用耦合度模型<sup>[32-33]</sup>进行量化,环境足迹与居民福祉的关系越趋于有序时耦合度越高;耦合程度利用耦合协调度模型<sup>[34-35]</sup>进行量化,环境足迹与居民福祉越处于较高的耦合水平时,耦合协调度越高。耦合度和耦合协调度可以作为衡量环境足迹与居民福祉是否协调发展的重要指标。

#### (1) 耦合度模型

建立环境足迹评价函数  $f(x)$ 、居民福祉评价函数  $g(y)$ , 分别如公式(21)、(22):

$$f(x) = \sum_{i=1}^m a_m x_m \quad (21)$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^n b_n y_n \quad (22)$$

式中,  $i$  和  $j$  为环境足迹和居民福祉的指标个数,  $a_m$ 、 $b_n$  为未知权重值, 且  $\sum_{i=1}^m a_m = 1$ 、 $\sum_{j=1}^n b_n = 1$ , 通过计算得出环境足迹综合指数和居民福祉综合指数, 环境友好程度与环境足迹综合指数成反比, 居民福祉水平与居民福祉综合指数成正比。

设  $C_v$  为  $f(x)$  和  $g(y)$  的离差系数, 计算方法如公式(23):

$$C_v = 2 \sqrt{1 - \frac{4f(x) \cdot g(y)}{[f(x) + g(y)]^2}} \quad (23)$$

当  $[f(x) + g(x)]^2$  越大时,  $C_v$  越小。由此, 可以进一步得到环境足迹与居民福祉的耦合关系, 如公式(24):

$$C = \left\{ \frac{4f(x) \cdot g(y)}{[f(x) + g(y)]^2} \right\}^k \quad (24)$$

其中,  $C$  为耦合度,  $k$  为调节系数, 参考已有研究, 取值  $k=2$ <sup>[36]</sup>。  $C$  的取值范围为  $[0, 1]$ ,  $C$  值越大表示环境足迹与居民福祉之间的耦合程度较好, 系统有序发展。本文采用中值分段法<sup>[37]</sup>将耦合度进行分类, 如表 5 所示。

#### (2) 耦合协调度模型

引入耦合协调度模型量化环境足迹与居民福祉的耦合协调程度, 如公式(25)、(26)。

$$S = \sqrt{C \times P} \quad (25)$$

$$P = \frac{f(x) + g(y)}{2} \tag{26}$$

其中, $S$  为耦合协调度; $P$  为环境足迹与居民福祉的综合调和指数。 $S$  值越高,表明居民福祉与环境足迹的耦合程度越协调。 $S$  的取值为 $[0,1]$ ,运用中值分段法将耦合协调度进行分类,如表 6 所示。

表 5 三江源地区环境足迹与居民福祉的耦合度分类

| 耦合度<br>Coupling    | 耦合阶段<br>Coupling Phase | 耦合特征<br>Coupling Features |
|--------------------|------------------------|---------------------------|
| $0 < C \leq 0.3$   | 低水平耦合                  | 居民福祉较低,环境足迹水平较高           |
| $0.3 < C \leq 0.5$ | 拮抗阶段                   | 居民福祉不断提高,与环境足迹的矛盾开始突出     |
| $0.5 < C \leq 0.8$ | 磨合阶段                   | 居民福祉与环境足迹之间开始良性耦合         |
| $0.8 < C < 1$      | 高水平耦合                  | 居民福祉与环境足迹之间相互促进、协同发展      |

表 6 三江源地区环境足迹与居民福祉的耦合协调度分类

| 协调度<br>Coordination | 协调等级<br>Coordination Level | 协调特征<br>Coordination Characteristics |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| $0 < S \leq 0.3$    | 中度失调                       | 环境足迹与居民福祉发展呈现明显负相关                   |
| $0.3 < S \leq 0.5$  | 轻度失调                       | 环境足迹与居民福祉发展呈现较明显负相关                  |
| $0.5 < S \leq 0.8$  | 初级协调                       | 环境足迹与居民福祉基本协调发展                      |
| $0.8 < S < 1$       | 中级协调                       | 环境足迹与居民福祉均衡发展                        |

在此基础上引入参考系数  $Q = g(y)/f(x)$  <sup>[38]</sup>,判断在相应耦合协调发展水平下,环境足迹与居民福祉的发展类型,如表 7 所示。

2.4.2 “环境足迹-居民福祉”指标体系建立

三江源地区环境足迹与居民福祉存在复杂的相互作用关系,随着时间变化呈动态变化特征。环境足迹指标体系一般包括水足迹、碳足迹、氮足迹、磷足迹、生态足迹 5 类指标,在本文中五类环境足迹具有相同的权重。居民福祉体系包括生产总值、居民人均可支配收入、粮食总产量、农作物种植面积、卫生机构、养老保险参保人数、注册在校学生数等 15 个指标,如表 8 所示。通过熵值法确定指标权重,并进一步计算耦合度、耦合协调度、综合调和指数、参考系数。

表 7 青海省环境足迹与居民福祉的发展类型分类

| Table 7 Classification of development types of the environmental footprint and human well-being in the Three-Rivers Headwaters region |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| $Q$                                                                                                                                   | 发展类型<br>Type of Development |
| $Q < 0.8$                                                                                                                             | 环境发展滞后型                     |
| $0.8 \leq Q \leq 1.2$                                                                                                                 | 福祉和环境发展同步型                  |
| $Q > 1.2$                                                                                                                             | 福祉发展滞后型                     |

3 结果与分析

3.1 三江源地区人均环境足迹与环境边界限额

三江源地区环境足迹与边界限额如表 9、表 10 所示。2000—2018 年三江源地区碳足迹快速增长,人均碳足迹由 2000 年的 4.39t/人增至 2018 年的 18.29t/人,增长了 4.17 倍,人均碳足迹超过碳边界限额。三江源地区水足迹呈波动状态,2000—2007 年,人均水足迹由 474.23m<sup>3</sup>/人增至 614.86m<sup>3</sup>/人,2007—2009 年出现短暂下降,降至 585.97m<sup>3</sup>/人,2009—2017 年再次呈上升趋势,最高达到 704.42m<sup>3</sup>/人,自 2007 年以后,三江源地区人均水足迹超过水边界限额。2000—2018 年三江源地区可再生土地足迹、能源类土地足迹均超过土地边界,人类基础设施用地足迹呈波动状态,2005—2009 年该类用地足迹超过土地边界,进而得到三江源地区人均生



态足迹最高达到  $5.93\text{hm}^2/\text{人}$ , 整体呈增长趋势且自 2001 年以后人均生态足迹均超过生态边界限额。2000—2018 年三江源地区人均氮足迹总体呈波动状态, 2000—2012 年呈上升状态最高达到  $5.69\text{kg}/\text{人}$ , 此后略有下降, 2000—2007 年人均氮足迹小于氮边界限额, 2008—2018 年人均氮足迹超过氮边界限额。2000—2018 年三江源地区人均磷足迹总体呈上升趋势最高达到  $4.58\text{kg}/\text{人}$ , 19 年间三江源地区人均磷足迹均低于磷边界限额。整体来看, 2000—2018 年三江源地区人均环境足迹呈现波动上升趋势, 但增速在不断放缓, 说明 2000—2018 年三江源地区在发展过程中随着人口、资源投入、家庭消费增加等因素的影响, 环境压力也有所增加, 但同时经济社会发展、生态环境保护政策落实、居民环保意识提高等因素正在发挥减缓环境压力的作用。

表 8 三江源地区“环境足迹-居民福祉”指标体系构建

Table 8 Indicator system of the assessment on the environmental footprint and human well-being in the Three-Rivers Headwaters region

| 体系分类<br>System<br>classification               | 指标<br>Index   | 变量<br>Variable | 体系分类<br>System<br>classification | 指标<br>Index              | 变量<br>Variable |
|------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------------------------|--------------------------|----------------|
| 环境足迹指标<br>体系 $f(x)$                            | 水足迹           | $x_1$          |                                  | 奶类总产量/t                  | $y_6$          |
| Indicator system of<br>environmental footprint | 碳足迹           | $x_2$          |                                  | 农作物种植面积( $\text{hm}^2$ ) | $y_7$          |
|                                                | 氮足迹           | $x_3$          |                                  | 卫生机构/个                   | $y_8$          |
|                                                | 磷足迹           | $x_4$          |                                  | 病床数/张                    | $y_9$          |
|                                                | 生态足迹          | $x_5$          |                                  | 安全事故死亡人数/人               | $y_{10}$       |
| 居民福祉指标<br>体系 $g(y)$                            | 生产总值/亿元       | $y_1$          |                                  | 交通事故事故/起                 | $y_{11}$       |
| Indicator System of<br>Human Well-being        | 农村居民人均可支配收入/元 | $y_2$          |                                  | 养老保险参保人数/人               | $y_{12}$       |
|                                                | 城镇居民人均可支配收入/元 | $y_3$          |                                  | 医疗保险参保人数/人               | $y_{13}$       |
|                                                | 粮食总产量/t       | $y_4$          |                                  | 城镇登记失业率/%                | $y_{14}$       |
|                                                | 肉类总产量/t       | $y_5$          |                                  | 注册在校学生数/人                | $y_{15}$       |

表 9 三江源地区人均环境足迹

Table 9 Environmental footprint per capita of the Three-Rivers Headwaters region

| 年份<br>Years | 三江源地区人均环境足迹<br>Environmental footprint per capita of the Three-Rivers Headwaters region |                                                                  |                                                                         |                                                  |                                                    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|             | 人均碳足迹<br>Carbon footprint per<br>capita/(t/人)                                           | 人均水足迹<br>Water footprint per<br>capita/( $\text{m}^3/\text{人}$ ) | 人均生态足迹<br>Ecological footprint per<br>capita/( $\text{hm}^2/\text{人}$ ) | 人均氮足迹<br>Nitrogen footprint per<br>capita/(kg/人) | 人均磷足迹<br>Phosphorus footprint<br>per capita/(kg/人) |
|             |                                                                                         |                                                                  |                                                                         |                                                  |                                                    |
| 2000        | 4.39                                                                                    | 474.23                                                           | 1.80                                                                    | 4.27                                             | 3.43                                               |
| 2001        | 4.54                                                                                    | 501.37                                                           | 2.07                                                                    | 4.59                                             | 3.67                                               |
| 2002        | 4.88                                                                                    | 519.05                                                           | 2.49                                                                    | 4.35                                             | 3.54                                               |
| 2003        | 5.31                                                                                    | 532.84                                                           | 2.81                                                                    | 4.26                                             | 3.49                                               |
| 2004        | 6.40                                                                                    | 553.03                                                           | 3.10                                                                    | 4.34                                             | 3.56                                               |
| 2005        | 7.77                                                                                    | 594.39                                                           | 4.01                                                                    | 4.41                                             | 3.74                                               |
| 2006        | 8.79                                                                                    | 593.66                                                           | 3.84                                                                    | 4.58                                             | 3.72                                               |
| 2007        | 9.60                                                                                    | 614.86                                                           | 4.91                                                                    | 4.80                                             | 3.86                                               |
| 2008        | 10.39                                                                                   | 595.80                                                           | 5.85                                                                    | 5.02                                             | 4.03                                               |
| 2009        | 10.65                                                                                   | 585.97                                                           | 5.93                                                                    | 5.09                                             | 4.08                                               |
| 2010        | 11.52                                                                                   | 689.61                                                           | 3.14                                                                    | 5.27                                             | 4.17                                               |
| 2011        | 14.19                                                                                   | 695.56                                                           | 3.29                                                                    | 5.43                                             | 4.31                                               |
| 2012        | 15.54                                                                                   | 603.45                                                           | 3.71                                                                    | 5.69                                             | 4.51                                               |
| 2013        | 16.71                                                                                   | 620.59                                                           | 4.15                                                                    | 5.37                                             | 4.33                                               |
| 2014        | 17.29                                                                                   | 631.41                                                           | 3.24                                                                    | 5.41                                             | 4.40                                               |
| 2015        | 17.76                                                                                   | 648.46                                                           | 2.49                                                                    | 5.46                                             | 4.47                                               |
| 2016        | 17.50                                                                                   | 674.16                                                           | 2.49                                                                    | 5.55                                             | 4.58                                               |
| 2017        | 17.71                                                                                   | 702.05                                                           | 5.14                                                                    | 5.48                                             | 4.55                                               |
| 2018        | 18.29                                                                                   | 704.42                                                           | 5.85                                                                    | 5.47                                             | 4.56                                               |

表 10 三江源地区环境边界限额  
Table 10 Environmental boundary quotas in the Three-Rivers Headwaters region

| 年份<br>Years | 三江源地区环境边界限额<br>Environmental Boundary Quotas in the Three-Rivers Headwaters region |                                               |                                                      |                                     |                                       |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|             | 碳边界<br>Carbon boundary/<br>(t/人)                                                   | 水边界<br>Water boundary/<br>(m <sup>3</sup> /人) | 生态边界<br>Ecological boundary/<br>(hm <sup>2</sup> /人) | 氮边界<br>Nitrogen boundary/<br>(kg/人) | 磷边界<br>Phosphorus boundary/<br>(kg/人) |
| 2000        | 2.20                                                                               | 660.91                                        | 2.12                                                 | 5.65                                | 9.04                                  |
| 2001        | 2.18                                                                               | 652.59                                        | 2.09                                                 | 5.58                                | 8.93                                  |
| 2002        | 2.15                                                                               | 644.44                                        | 2.07                                                 | 5.50                                | 8.82                                  |
| 2003        | 2.12                                                                               | 636.43                                        | 2.05                                                 | 5.44                                | 8.71                                  |
| 2004        | 2.10                                                                               | 628.56                                        | 2.03                                                 | 5.37                                | 8.60                                  |
| 2005        | 2.07                                                                               | 620.80                                        | 2.01                                                 | 5.30                                | 8.49                                  |
| 2006        | 2.04                                                                               | 613.14                                        | 2.00                                                 | 5.24                                | 8.38                                  |
| 2007        | 2.02                                                                               | 605.60                                        | 1.98                                                 | 5.17                                | 8.28                                  |
| 2008        | 2.00                                                                               | 598.15                                        | 1.97                                                 | 5.11                                | 8.18                                  |
| 2009        | 1.97                                                                               | 590.85                                        | 1.96                                                 | 5.05                                | 8.08                                  |
| 2010        | 1.95                                                                               | 583.68                                        | 1.94                                                 | 4.99                                | 7.98                                  |
| 2011        | 1.92                                                                               | 576.65                                        | 1.93                                                 | 4.93                                | 7.89                                  |
| 2012        | 1.90                                                                               | 569.76                                        | 1.91                                                 | 4.87                                | 7.79                                  |
| 2013        | 1.88                                                                               | 563.02                                        | 1.90                                                 | 4.81                                | 7.70                                  |
| 2014        | 1.86                                                                               | 556.47                                        | 1.88                                                 | 4.76                                | 7.61                                  |
| 2015        | 1.84                                                                               | 550.10                                        | 1.86                                                 | 4.71                                | 7.52                                  |
| 2016        | 1.82                                                                               | 543.91                                        | 1.85                                                 | 4.65                                | 7.43                                  |
| 2017        | 1.80                                                                               | 537.91                                        | 1.83                                                 | 4.60                                | 7.35                                  |
| 2018        | 1.78                                                                               | 532.09                                        | 1.82                                                 | 4.55                                | 7.27                                  |

3.2 三江源地区居民福祉状况

3.2.1 三江源地区居民福祉评价指标体系权重

由表 11 可见要素层的权重最大的是社会文化福祉,其次是安全健康福祉,最小的是基本需求福祉;具体权重值为:社会文化福祉 0.3411、安全健康福祉 0.3369、基本需求福祉 0.3220。对于准则层权重,权重值由大

表 11 三江源地区居民福祉评价指标体系权重  
Table 11 The weights of the evaluation indices on human well-being in the Three-Rivers Headwaters region

| 要素层<br>Element layer                     | 权重<br>Weights | 准则层<br>Criterion layer | 权重<br>Weights | 指标层<br>Index layer      | 权重<br>Weights |
|------------------------------------------|---------------|------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| 基本需求福祉<br>Basic needs well-being         | 0.3220        | 基本收入                   | 0.1979        | 生产总值/亿元                 | 0.0832        |
|                                          |               |                        |               | 农村居民人均可支配收入/元           | 0.0735        |
|                                          |               |                        |               | 城镇居民人均可支配收入/元           | 0.0832        |
|                                          |               | 基本物质                   | 0.2702        | 粮食总产量/t                 | 0.0449        |
|                                          |               |                        |               | 肉类总产量/t                 | 0.0405        |
| 奶类总产量/t                                  | 0.0462        |                        |               |                         |               |
| 安全健康福祉<br>Safety and health well-being   | 0.3369        | 身体健康                   | 0.1328        | 农作物种植面积/hm <sup>2</sup> | 0.0536        |
|                                          |               |                        |               | 卫生机构/个                  | 0.0392        |
|                                          |               |                        |               | 病床数/张                   | 0.1101        |
|                                          |               | 安全                     | 0.1357        | 安全事故死亡人数/人              | 0.0525        |
|                                          |               |                        |               | 交通事故/起                  | 0.0305        |
| 社会文化福祉<br>Social and cultural well-being | 0.3411        | 良好的社会关系                | 0.1962        | 养老保险参保人数/人              | 0.0964        |
|                                          |               |                        |               | 医疗保险参保人数/人              | 0.1212        |
|                                          |               |                        |               | 城镇登记失业率/%               | 0.0714        |
|                                          |               | 文化教育                   | 0.0672        | 注册在校学生数/人               | 0.0535        |

到小排列依次为:基本物质、基本收入、良好的社会关系、安全、身体健康、文化教育。指标层平均权重为0.067,其中权重最大的是医疗保险参保人数,权重最小的是卫生机构数、交通事故数。从上述结果来看,三江源地区已经进入了以社会福祉为主导的福祉需求阶段。近年来经济快速发展,三江源地区居民的物质福祉已经得到保障,所以其占比例最低;由于生态环境的改善以及经济发展和社会保障体系日趋完善,因此居民的安全与健康福祉需求也得到基本满足。随着经济水平的提高,当地居民对社会文化福祉的需求日益强烈。

3.2.2 三江源地区居民福祉的时间变化

2000—2018 年三江源地区居民福祉综合得分变化趋势如图 2 所示,19 年间三江源地区居民福祉水平整体呈上升趋势,2000—2014 年呈波动上升趋势,2014—2016 略有下降,2016—2018 呈上升趋势。总体而言,三江源地区居民福祉变化呈现出阶段性发展特征,说明居民福祉依赖于多种因素,如自然资源消耗、社会经济因素的变化等。

3.3 环境足迹与居民福祉耦合协调状况分析

由表 12 和图 3 可见,2000—2018 年三江源地区环境足迹与居民福祉系统的耦合度和耦合协调度呈波动上升趋势。从耦合度指标来看,2000—2018 年环境足迹与居民福祉耦合度呈现低水平波动上升趋势,随着时

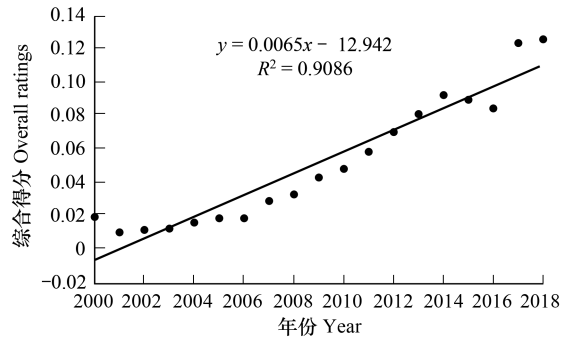


图 2 2000—2018 年三江源地区居民福祉综合得分

Fig.2 Comprehensive score of human well-being in the Three-Rivers Headwaters region from 2000 to 2018

表 12 2000—2018 年三江源地区环境足迹居民福祉耦合协调状况

Table 12 Coupling coordination conditions of human well-being with environmental footprint in the Three-Rivers Headwaters region from 2000 to 2018

| 年份<br>Years | $f(x)$ | $g(y)$ | $C$    | $P$    | $S$    | $Q$     | 耦合阶段<br>Coupling phase | 协调等级<br>Coordination level | 发展类型<br>Type of development |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 2000        | 0.0010 | 0.2456 | 0.0018 | 0.0693 | 0.0112 | 92.0719 | 低水平耦合                  | 中度失调                       | 福祉发展滞后型                     |
| 2001        | 0.1130 | 0.2636 | 0.7225 | 0.1054 | 0.3119 | 1.8682  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 福祉发展滞后型                     |
| 2002        | 0.0888 | 0.2249 | 0.7850 | 0.1021 | 0.3171 | 1.8402  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 福祉发展滞后型                     |
| 2003        | 0.0940 | 0.2034 | 0.7783 | 0.1118 | 0.3307 | 1.8107  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 福祉发展滞后型                     |
| 2004        | 0.1688 | 0.2200 | 0.7365 | 0.1647 | 0.3928 | 0.6954  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2005        | 0.3175 | 0.2181 | 0.7633 | 0.2471 | 0.4343 | 0.4756  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2006        | 0.3422 | 0.2674 | 0.7123 | 0.2587 | 0.4292 | 0.4337  | 磨合阶段                   | 轻度失调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2007        | 0.4834 | 0.3008 | 0.7709 | 0.3687 | 0.5331 | 0.4822  | 磨合阶段                   | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2008        | 0.5824 | 0.2953 | 0.7348 | 0.4351 | 0.5654 | 0.4515  | 磨合阶段                   | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2009        | 0.5989 | 0.2894 | 0.8334 | 0.4764 | 0.6301 | 0.5442  | 高水平耦合                  | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2010        | 0.6255 | 0.3112 | 0.8705 | 0.4967 | 0.6576 | 0.5888  | 高水平耦合                  | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2011        | 0.7236 | 0.3920 | 0.8828 | 0.5800 | 0.7156 | 0.6053  | 高水平耦合                  | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2012        | 0.7374 | 0.4377 | 0.9302 | 0.6337 | 0.7678 | 0.6827  | 高水平耦合                  | 初级协调                       | 环境发展滞后型                     |
| 2013        | 0.7188 | 0.4583 | 0.9778 | 0.6606 | 0.8037 | 0.8090  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |
| 2014        | 0.7125 | 0.6163 | 0.9992 | 0.7079 | 0.8410 | 0.9608  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |
| 2015        | 0.7197 | 0.5289 | 0.9989 | 0.7092 | 0.8417 | 0.9536  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |
| 2016        | 0.7734 | 0.5725 | 0.9840 | 0.7124 | 0.8372 | 0.8354  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |
| 2017        | 0.9202 | 0.5630 | 0.9965 | 0.8806 | 0.9368 | 0.9200  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |
| 2018        | 0.9563 | 0.6401 | 0.9829 | 0.8806 | 0.9304 | 0.8304  | 高水平耦合                  | 中级协调                       | 福祉与环境发展同步型                  |

间推移,耦合度主导类型由磨合发展为高水平耦合。2000 年处于低水平耦合阶段,环境足迹系统与居民福祉系统关联较弱,系统呈无序发展状态;2001—2008 年处于磨合阶段,环境足迹系统与居民福祉系统间相互作用增强,进一步磨合,呈现良性耦合趋势;2009—2018 年升至高水平耦合阶段,环境足迹系统与居民福祉系统良性互动不断增强,有序性提高。

从耦合协调度指标来看,2000 年处于中度失调阶段,环境足迹和居民福祉指标均处于较低水平,经济增长有限,表现为福祉发展滞后型;2001—2006 年为轻度失调阶段,环境足迹与居民福祉关联水平逐渐提高,2001—2003 年表现为福祉发展滞后型,2004—2006 年由于重视经济发展而加大资源投入导致环境足迹增加,表现为环境发展滞后型;2007—2012 年为初级协调阶段,兼顾环境足迹与居民福祉发展,但自然资源投入和环境治理有待进一步加强,表现为环境发展滞后型;2013—2018 年达到中级协调阶段,环境足迹与居民福祉有序发展且逐步协调,由于经济发展导致自然资源投入增加和居民福祉发展,表现为环境和福祉发展同步型。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于环境足迹和居民福祉指标,对三江源地区 2000—2018 年的环境情况、居民福祉情况、环境足迹与居民福祉的耦合协调关系进行了评估,主要结论如下:

(1) 2000—2018 年三江源地区人均环境足迹均超过环境边界限额的足迹指标包括碳足迹、氮足迹;人均环境足迹均小于环境边界限额的足迹指标为磷足迹;自 2001 年人均生态足迹均超过生态边界限额,自 2007 年以来三江源地区人均水足迹超过水边界限额,自 2008 年以来三江源地区人均氮足迹超过氮边界限额。2000—2018 年三江源地区人均环境足迹均呈超过环境边界限额的状态,这主要与地区发展所需要的能源利用、商品生产、土地利用、食品消费与生产等多种因素有关。三江源地区的经济发展伴随着资源消耗和环境退化,但随着社会经济水平的不断提高,环境足迹的增速正在放缓。

(2) 三江源地区居民福祉由基本需求、安全健康、社会文化三个层次的福祉构成,按重要性排序表现为社会文化福祉最高,其次是安全健康福祉、基本需求福祉。目前来看,三江源地区居民的物质福祉、安全与健康福祉需求基本得到满足,三江源地区已经进入以社会福祉为主导的福祉需求阶段。随着经济水平的提高,当地居民对社会文化福祉的需求日益强烈。2000—2018 年,三江源地区居民福祉年际变化趋势总体呈波动式上升,其中安全与健康福祉的波动最大且对当地居民福祉的贡献度最高。

(3) 通过分析三江源地区 2000—2018 年环境足迹与居民福祉的耦合度可以发现,环境足迹与居民福祉整体由无序发展到良性耦合,说明耦合程度随着时间推移不断提高。通过分析三江源地区 2000—2018 年环境足迹与居民福祉的耦合协调度可以发现,环境足迹与居民福祉由失调发展为协调,说明协调水平随着时间推移不断提高。此外,针对发展类型,2000—2003 年三江源地区协调发展类型为福祉发展滞后型,2004—2012 年协调发展类型为环境发展滞后型,2013—2018 年协调发展类型为福祉与环境发展同步型,这说明三江源地区在发展过程中居民福祉水平得到了提升,且不断优化其与环境足迹之间的不协调之处,使二者尽可能

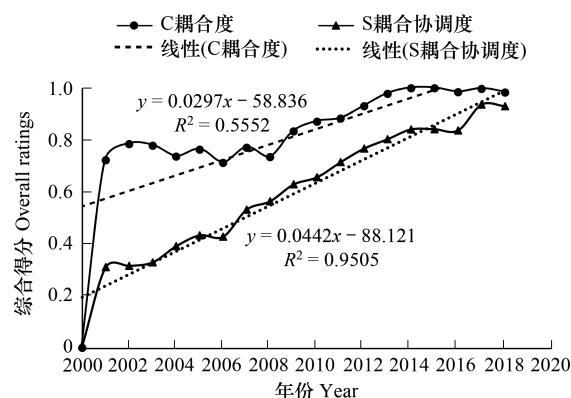


图3 2000—2018 年三江源地区环境足迹与居民福祉的耦合度与耦合协调度变化趋势

Fig.3 Changing trend of coupling degree and coupling coordination degree between environmental footprint and human well-being in the Three-Rivers Headwaters region from 2000 to 2018

同步发展。

## 4.2 讨论

(1) 人口-资源-环境构成复杂的耦合系统,人类活动对资源环境产生的影响通常具有整体效应。本文基于碳足迹、水足迹、生态足迹、氮足迹、磷足迹分析了 2000—2018 年三江源地区环境足迹的变化情况。结果表明,在不同的时间段,三江源地区环境足迹的动态变化存在较大差异。本文分别计算了 5 类环境足迹,而对 5 类环境足迹组合产生的复合影响的评估仍然有待于进一步评估,此外,由于数据限制还无法对三江源地区的不同行政区域进行具体分析。

(2) 居民福祉受自然、社会和经济等因素共同影响,本文仅通过可获取的统计数据计算了居民福祉,忽略了地区发展过程中自然条件、社会经济以及国家政策等其他因素的影响。因此,居民福祉评价方法亦需要深入研究,居民福祉的框架和具体指标选取还有待进一步修改和完善。在未来的研究中,既要关注客观居民福祉,还需要深入探讨主观居民福祉,构建包含经济、社会、教育、文化、健康和生态等指标的居民福祉测度模型,将收入水平、公共服务水平、投资水平、环境质量、可持续发展能力、人均预期寿命、生态系统服务等变量纳入评价模型,以全方位、多层次的揭示研究区的居民福祉水平和影响因素。

(3) 环境足迹、居民福祉、环境足迹与居民福祉之间的耦合关系是非常复杂的,本文构建了三江源地区环境足迹与居民福祉的关系分析框架,虽然有助于理解三江源地区环境足迹和居民福祉耦合度和耦合协调度提高的过程,但忽略了经济政策、人类主观能动性的影响。目前中国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段,高质量发展不仅意味着经济持续健康发展,也意味着民生福祉和生态环境的协调发展,各地区在大力发展经济的同时,更应加强生态环境的保护。因此,在今后的研究中需要更多关注环境足迹的动态性、居民福祉的复杂性、环境足迹与居民福祉的耦合协调关系如何进一步提高等问题。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dasgupta P S, Ehrlich P R. Pervasive externalities at the population, consumption, and environment nexus. *Science*, 2013, 340(6130): 324-328.
- [ 2 ] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, De Vries W, De Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [ 3 ] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [ 4 ] Giljum S, Hinterberger F, Lutter S. Measuring Natural Resource Use: Context, Indicators and EU Policy Processes. Vienna: SERI, 2008.
- [ 5 ] Stoeglehner G, Narodoslawsky M. Implementing ecological footprinting in decision-making processes. *Land Use Policy*, 2008, 25(3): 421-431.
- [ 6 ] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, De Wit C A, Hughes T, Van Der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.
- [ 7 ] Čuček L, Varbanov P S, Klemeš J J, Kravanja Z. Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy*, 2012, 44(1): 135-145.
- [ 8 ] Fang K, Heijungs R, De Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 508-518.
- [ 9 ] Hoekstra A Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*, 2014, 344(6188): 1114-1117.
- [ 10 ] Nykvist B, Persson Å, Moberg F, Persson L, Cornell S, Rockström J. National Environmental Performance on Planetary Boundaries: A Study for the Swedish Environmental Protection Agency. Bromma: Swedish Environmental Protection Agency, 2013.
- [ 11 ] Häyhä T, Lucas P L, Van Vuuren D P, Cornell S E, Hoff H. From planetary boundaries to national fair shares of the global safe operating space—how can the scales be bridged? *Global Environmental Change*, 2016, 40: 60-72.
- [ 12 ] Cole M J, Bailey R M, New M G. Tracking sustainable development with a national barometer for South Africa using a downscaled “safe and just space” framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(42): E4399-E4408.
- [ 13 ] Dao H, Peduzzi P, Friot D. National environmental limits and footprints based on the Planetary Boundaries framework: the case of Switzerland. *Global Environmental Change*, 2018, 52: 49-57.



- [14] 黄甘霖, 姜亚琼, 刘志锋, 聂梅, 刘阳, 李经纬, 鲍宇阳, 王玉海, 邬建国. 人类福祉研究进展——基于可持续科学视角. 生态学报, 2016, 36(23): 7519-7527.
- [15] Diener E, Suh E. Measuring quality of life: economic, social, and subjective indicators. *Social Indicators Research*, 1997, 40(1/2): 189-216.
- [16] Smith L M, Case J L, Smith H M, Harwell L C, Summers J K. Relating ecosystem services to domains of human well-being: Foundation for a U.S. index. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 79-90.
- [17] Maslow A H. *Motivation and Personality*. Western Classics. Psychology; 8. Beijing: China Social Sciences Pub. House, 1999.
- [18] Ryan R M, Deci E L. On happiness and human potentials: A review of research on hedonic and eudaimonic well-being. *Annual Review of Psychology*, 2001, 52: 141-166.
- [19] Oswald A J, Wu S. Objective confirmation of subjective measures of human well-being: evidence from the U.S.A. *Science*, 2010, 327(5965): 576-579.
- [20] Summers J K, Smith L M, Case J L, Linthurst R A. A review of the elements of human well-being with an emphasis on the contribution of ecosystem services. *AMBIO*, 2012, 41(4): 327-340.
- [21] 杨爱婷, 宋德勇. 中国社会福利水平的测度及对低福利增长的分析——基于功能与能力的视角. 数量经济技术经济研究, 2012, 29(11): 3-17, 148-148.
- [22] 诸大建, 张帅. 基于生态足迹的中国福利水平及其影响因素研究. 城市与环境研究, 2014, 1(1): 18-33.
- [23] 王圣云, 韩亚杰, 任慧敏, 李晶. 中国省域生态福利绩效评估及其驱动效应分解. 资源科学, 2020, 42(5): 840-855.
- [24] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London: Earthscan, 2011.
- [25] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [26] GFN. *The National Footprint Accounts*, 2011 Edition. Oakland: GFN, 2012.
- [27] Stevens C J, Leach A M, Dale S, Galloway J N. Personal nitrogen footprint tool for the United Kingdom. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(7): 1563-1569.
- [28] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erisman J W, Kohn R, Kitzes J. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40-66.
- [29] 冼超凡, 欧阳志云. 城乡居民食物氮足迹估算及其动态分析——以北京市为例. 生态学报, 2016, 36(8): 2413-2421.
- [30] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erisman J W, Kohn R, Kitzes J. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40-66.
- [31] 张丹, 伦飞, 成升魁, 高利伟, 刘晓洁, 曹晓昌, 秦奇, 刘尧, 白军飞, 许世卫, 喻闻. 城市餐饮食物浪费的磷足迹及其环境排放——以北京市为例. 自然资源学报, 2016, 31(5): 812-821.
- [32] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, De Vries W, De Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [33] Dao H, Peduzzi P, Friot D. National environmental limits and footprints based on the Planetary Boundaries framework: The case of Switzerland. *Global Environmental Change*, 2018, 52: 49-57.
- [34] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨. 统计与决策, 2015, (2): 12-15.
- [35] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析——兼论三系统耦合公式及其扩展形式. 自然资源学报, 2017, 32(5): 788-799.
- [36] 刘耀彬, 宋学锋. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 91-96.
- [37] 席娟, 张毅, 杨小强. 陕西省城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2013, 47(1): 117-123.
- [38] 韩瑞玲, 佟连军, 佟伟铭, 于建辉. 沈阳经济区经济与环境系统动态耦合协调演化. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2673-2680.
- [39] 刘秀丽, 张勃, 郑庆荣, 何旭强, 张调风, 贾艳青, 罗正明. 黄土高原土石山区退耕还林对农户福祉的影响研究——以宁武县为例. 资源科学, 2014, 36(2): 397-405.
- [40] 李伯华, 刘艳, 刘沛林, 窦银娣. 湖南省人居环境系统耦合度的时空演化研究. 统计与决策, 2016, (18): 104-107.
- [41] 郝家祺. 农民福祉的影响因素分析及其与生态系统服务的耦合关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.