

DOI: 10.5846/stxb202007151855

杨武, 陶俊杰, 陆巧玲. 基于生态系统服务视角的人类福祉评估技术方法体系. 生态学报, 2021, 41(2): 730-736.

Yang W, Tao J J, Lu Q L. Methodologies of human well-being assessment from the ecosystem service perspective. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 730-736.

基于生态系统服务视角的人类福祉评估技术方法体系

杨 武*, 陶俊杰, 陆巧玲

浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

摘要: 不管是联合国 2030 可持续发展目标, 还是我国的生态文明建设, 最终的目标都是协调好人与自然的关系, 保证生态系统服务的可持续供给以提高人类福祉。过去二十年来, 随着生态系统服务成为国际生态学研究的前沿和热点, 生态系统服务与人类福祉之间的关系也得到越来越多的重视。而定量刻画二者之间关系的前提是在一个统一的概念框架下建立各自的量化评估指标体系。不过, 目前大部分的研究集中在生态系统服务的评估, 而对人类福祉评估的研究相对匮乏, 因此急需一套对人类福祉进行评估的技术方法。笔者结合多年的理论和实践, 对人类福祉评估的理论基础与技术方法进行了系统地归纳与整理, 以期对生态系统服务与人类福祉之间量化关系的研究提供参考。

关键词: 生态产品; 生态文明; 生态系统服务; 绩效评估; 可持续发展目标

Methodologies of human well-being assessment from the ecosystem service perspective

YANG Wu*, TAO Junjie, LU Qiaoling

College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: No matter the United Nation 2030 Sustainable Development Goals or China's ecological civilization construction, the ultimate goal is to coordinate the relationships between human and nature, so as to sustain the provision of ecosystem goods and services to improve human well-being. During the past two decades, as ecosystem service research becomes the frontier and hotspot, there has been more and more attention paid to the linkages between ecosystem services and human well-being. To quantify their linkages, the premise is to establish corresponding index systems to quantify ecosystem services and human well-being, respectively. Nevertheless, the majority of current research focuses on ecosystem service assessment, there are relatively less studies on human well-being assessment that is compatible to the ecosystem service framework. Therefore, it is urgently needed to provide a set of methodologies for developing human well-being indices taking the linkages between ecosystem services and human well-being into consideration. Based on many years' theoretic analyses and practices, we synthesized the theoretic bases and methodologies for human well-being assessment. We compared the advantages and disadvantages of different methods. We recommend the improved factor analysis approach for five main reasons. First, the improved factor analysis approach provides a general and pragmatic composite index development method that combines the theoretic design with data mining technique, which largely improves the internal and external consistency of developed human well-being index system. Second, the improved factor analysis approach is scale free (e.g., from household, township, to county and national levels) and can also be applied to different conceptual framework. This is particularly useful to design studies under different ecological and socioeconomic contexts. Thirdly, the improved factor

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0503404); 国家自然科学基金项目(71673247); 浙江省杰出青年基金项目(LR18D010001)

收稿日期: 2020-07-15; **修订日期:** 2020-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyang@zju.edu.cn

analysis approach is flexible for weighting setting. The weighting can be generated by data variation or be customized by management goals. Fourthly, the improved factor analysis approach does not have the measurement error free assumption and is more robust, especially for secondary data. Considering it is often time consuming and costly to collect first hand data, such advantage makes it is possible to develop effective human well-being indices based on secondary data (e.g., statistical yearbook data). Finally, the improved factor analysis approach produces a composite index system, which includes the overall index and sub-indices. Such index system can be used both for analyzing large-scale spatiotemporal dynamics and small-scale detailed linkages between different ecosystem services and various dimensions of human well-being. We hope that our synthesis will lay a foundation for the quantification of linkages between ecosystem services and human well-being.

Key Words: ecological product; eco-civilization; ecosystem services; impact evaluation; Sustainable Development Goals

人类社会发展的终极目标是提高人类福祉^[1]。在 2015 年 9 月联合国公布的可持续发展目标 2030 中,17 个目标每一个都直接或间接关系到人类福祉^[1]。自从联合国千年生态系统评估之后,生态系统服务与人类福祉之间的联系越来越受到重视^[2-5]。这是因为不管是扶贫还是可持续发展,很大程度上都依赖于可持续地提供各种类型的生态系统服务以改善人类福祉。

近年来,不同尺度上生态系统服务的评估以及不同服务之间权衡与协同的研究方兴未艾^[6-8]。不过,如何定量评估人类福祉仍然是可持续性政策规划和评估的重点和难点。尽管评估人类福祉并不新鲜,但是之前的研究很多是定性的,许多定量的研究也只是包含人类福祉的一部分组分(如经济、心理、健康维度)^[5, 9],也少有将生态系统服务与福祉之间的关系纳入评估框架的。举例来说,以往的福祉研究包括生活满意指数^[10-11],快乐星球指数^[12]和联合国公布的人类发展指数^[13]等。也有一些福祉的研究,如真实进步指数^[14]、包容性财富指数^[15]、更好生活指数^[16],考虑到了大自然对人类社会的影响,但是也并非为研究生态系统服务与人类福祉设计。

为数不多的研究尝试在评估人类福祉时将生态组分纳入到评估框架中。譬如,联合国千年生态系统评估将人类福祉分为基本生活条件、安全、健康、良好社会关系、选择和行动自由五个维度^[17]。Summers 等^[18]将人类福祉划分为基本生活需求、经济需求、环境需求和主观幸福感。Smith 等^[19]提出了一个评估美国居民福祉的框架,将福祉分为健康、社会凝聚力、教育、安全、生活标准、休闲时间、精神和文化满足、生活满意度、以及与大自然的联系九个维度。Yang 等^[20]基于千年生态系统评估的框架,提出了一套基于量表的人类福祉评估体系,并用于评估汶川大地震的影响,以及研究生态系统服务依赖度对居民福祉变化的影响^[21]。Milner-Gulland 等^[22]提出了一个发展中国家福祉评估框架,将个体福祉划分为满足需求、追求目标和生活质量三个维度,并建议将福祉应用到保护政策的绩效评估中。徐建英等^[23]从当地居民的角度以卧龙保护区为例,研究了生态系统服务、福祉贡献和受益者之间的联系。Hori 等^[24]研究了沿海地区生态系统服务与人类福祉的关系,并进行了加拿大,中国,日本,韩国,俄罗斯和美国之间的比较。

我国政府也越来越重视提高和改善民生福祉,尤其是生态环境对民生福祉的贡献。习近平总书记在十九大报告中指出,“增进民生福祉是发展的根本目的。”在 2018 年全国生态环境保护大会的重要讲话中,习近平总书记再次强调,“良好生态环境是最普惠的民生福祉,坚持生态惠民、生态利民、生态为民,重点解决损害群众健康的突出环境问题,不断满足人民日益增长的优美生态环境需要。”2019 年习近平总书记在江西省考察调研时强调说:“共产党就是为人民群众谋幸福的,党中央想的就是千方百计让老百姓过上好日子。”

尽管有关民生福祉的讨论很多,但是我国对福祉的系统、定量研究仍然还处于摸索阶段。笔者结合前期在国内外生态系统服务和福祉定量研究的理论与实践^[3, 20-21, 25],对人类福祉评估的理论基础与技术方法进行系统地归纳与整理,以期为生态系统服务与人类福祉之间量化关系、生态保护政策对生态系统服务和人类福祉作用效应的研究奠定基础,为我国进一步推进生态文明制度建设提供科学依据。

1 评估流程

人类福祉评估总体可以分为五个部分:概念框架、指标选择、指数构建、指数效验与评估、以及指数应用(图1)。由于人类福祉是一个综合的概念,通常需要人为划分为不同的维度(或组分)进行评估,这个分解的过程就是建立概念框架。概念框架建立后,就需要对不同维度设计指标进行量化,这个设计筛选的过程就是指标选择。通常指标选择有两种方式:一种是结合理论分析和文献梳理设计量表,通过问卷调查获得第一手的指标数据;另一种是利用已有的统计数据,筛选合适的福祉指标。不管是哪一种方式,指标选择一般都遵循数据可获得性、较好的数据质量、以及理论上和当地实际上能表征福祉的状态的原则。指标选择之后就是通过构建指数模型获得福祉指数体系(通常包含综合指数和分维度指数),指数开发是一个不断迭代和完善的过程,指数应用结果的好坏也能反馈于进一步修订和完善概念框架、指标选择、指数构建、指数效验与评估步骤(图1)。

1.1 指数构建

1.1.1 常规的因子分析法

除了假设每个维度均等权重系数取平均值的方法,常用的构建人类福祉指数的方法包括主成分分析法(Principle component Analysis, PCA),层次分析法(Antalytical Hierarchy Processing, AHP)和德尔菲法(Delphi method)。主成分分析法通过正交变换,将原变量进行线性组合转换为一组主成分,然后选取几个方差贡献率足够大(如累计贡献率80%以上)的主成分来表示原变量^[26]。层次分析法基于专家对各指标重要性的成对比较,并通过一定的数理统计过程将比较结果转换成各指标的权重^[27-28]。德尔菲法则是一种由专家参与进行权重设定的方法^[29]。

1.1.2 改进的因子分析法

综合指数划分为几个维度通常是根据研究或管理的主观需求,而不是客观的实际。同时,与常规因子分析法一个指标只能表征一个维度的假设不同^[24-25],实际情况中一个指标本身是可以表征多个维度的,而且每个维度的权重可以不同^[1]。譬如,房子的建筑材料可以反映农户的基本生活条件,但同时也能表征农户的安全程度(如财产安全、人身安全)。针对于此,Yang等^[1]提出了一套新的因子分析法,该方法结合理论设计和数据挖掘的技术,利用结构方程模型实现了一个指标表征多个维度,并可以灵活设定权重(图2)。首先,可以通过验证性因子分析法(Confirmatory factor analysis, CFA)对理论设计的量表进行估计。然后,结合结构方程模型中调整指数(modification indices)通过探索性因子分析法(Exploratory factor analysis, EFA)增加或删减单个指标与各个维度之间的表征关系,以实现CFA模型的改进。

结构方程模型(Structural Equation Models, SEMs)是一种验证性多元统计分析方法。结构方程模型一般包括结构模型和测量模型两部分。其中,结构模型表征外生变量与内生变量之间关系,测量模型表征多个内生变量之间的关系。一般公式可以表达如下^[30]:

结构模型:

$$\gamma_j = b_\eta + B \gamma_j + \mu \xi_j + \theta_j \quad (1)$$

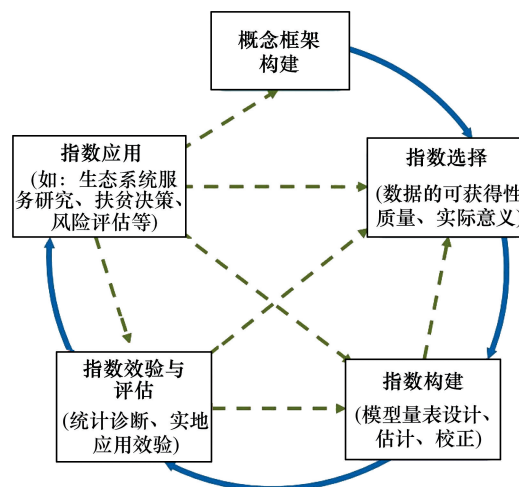


图1 人类福祉评估流程图

Fig.1 Flow chart of human well-being assessment

蓝色箭头代表评估的步骤,绿色箭头表示福祉指数的开发和应用是一个不断迭代完善的过程,任一个步骤发现了问题都可以回到之前的步骤进行修正和完善

测量模型:

$$y_j = b_y + \Lambda_y \gamma_j + \varepsilon_j \quad (2)$$

$$X_j = b_x + \Lambda_x \xi_j + \varphi_j \quad (3)$$

式中, γ_j 是潜在内生性变量矢量; B 是潜在内生性变量之间相关系数的矩阵; μ 是潜在外生性变量影响潜在内生性变量的回归系数矩阵; ξ_j 是第 j 个分析单元的潜在外生性变量矢量; y_j 是对应 γ_j 的一系列福祉测量指标的矢量; Λ_y 是 γ_j 对 y_j 的回归系数矩阵; X_j 是对应 ξ_j 的一系列福祉测量指标的矢量; Λ_x 是 ξ_j 对 X_j 的回归系数矩阵; b_y 、 b_x 是截距矢量; θ_j 、 ε_j 、 φ_j 是误差项。当没有结构模型, 只有测量模型, 也就是模型中没有潜在外生性变量时, 结构方程就退化为因子分析法 (Factor analysis)。当只有结构模型, 没有测量模型, 也就是模型中没有潜在变量时, 结构方程就退化为路径分析法 (Path analysis)。

1.2 指数效验与评估

指数质量的好坏可以通过有效性检验进行评估。

有效性检验又分为内部有效性检验和外部有效性检验。内部有效性可以通过量表的内部一致性和指数模型拟合度检验。

内部一致性可以通过信度测试 (Reliability test) 进行检验。量表整体的设计可以通过信度测试的 Cronbach's alpha 值判断, alpha 值在 0 到 1 之间, 值越大表明内部一致性越高, 通常要达到 0.6 以上。同时, 可以根据单个指标与同一个量表维度内其他指标的相关性或所有指标的相关性进行指标筛选, 通常相关性系数需要达到 0.3 以上^[31]。

指数模型的拟合度包括模型总体的拟合度和单个指标的统计检验量。以结构方程模型法为例, 模型总体拟合度指标包括卡方与自由度比率 (χ^2/df , 通常需要小于 3)、比较拟合指数 (Comparative Fit Index, CFI)、Tucker-Lewis 指数 (Tucker-Lewis Index, TLI)、近似误差均方根 (Root Mean Square Error of Approximation, RMSEA) 和标准化残差均方根 (Standardized Root Mean Square Residual, SRMSR)。CFI 和 TLI 通常需要大于 0.9, 而 RMSEA 和 SRMSR 通常需要小于 0.05^[32]。

外部有效性可以通过实地验证和指数应用进行检验。譬如, 可以通过地面样方数据或者高精度的影像数据进行生物多样性指数验证^[33-34]。对人类福祉指数, 可以结合实地农户调研的情况或者邀请熟悉当地情况的专家, 判断指数的时间动态和空间格局是否与实地调研情况相符。此外, 可以根据人类福祉指数与其他指标之间已知的关系进行外部有效性验证。譬如, 对于大多数国家来说, 人类福祉的提高往往伴随着农户收入的提升。与此同时, 城市化程度的提高往往与人类福祉水平改善成正相关^[1, 35]。

举例来说, 在四川省卧龙大熊猫自然保护区的研究中, Yang 等^[20]设计了一套新的量表以评估汶川大地震对人类福祉的影响, 信度测试和 CFA 模型拟合度都在 0.9 以上, 显示了很好的内部有效性。接着, Yang 等^[21]通过分析直接和间接驱动因子、农户生态系统服务依赖度对农户福祉变化的影响验证了福祉指数的外部有效性。在柬埔寨的福祉指数构建中, Yang 等^[1]利用统计数据, 结合量表设计和数据挖掘技术构建了公社尺度 (介于村和乡镇之间的行政单元) 上的人类福祉指数体系, 通过信度测试和结构方程模型拟合度指标对人类福祉指数体系的内部有效性进行了检验。同时, 根据农户福祉的时空格局、福祉指数与城市化程度 (如总人口数、人口密度、家庭数密度、道路密度) 对福祉综合指数的外部性进行了验证。

1.3 指数应用

人类福祉指数作为社会发展的综合衡量指标, 可以用于诸多方面的研究和管理。首先, 可以用于确定扶

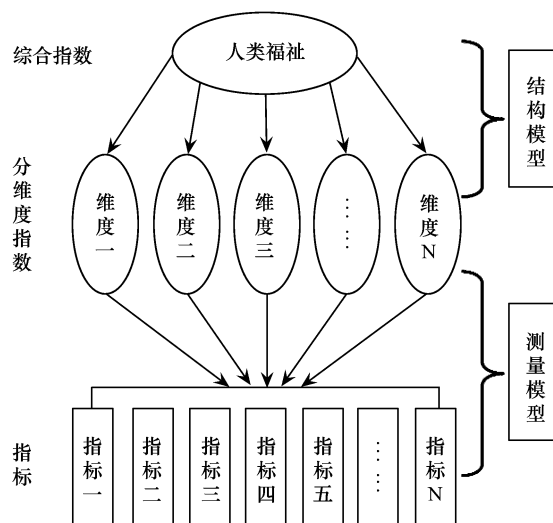


图2 基于结构方程模型的改进因子分析法示意图

Fig.2 Schematic diagram of improved factor analysis method based on structural equation model

贫的优先区域。福祉水平较低的地区或社会群体应该作为扶贫政策的优先区域, Yang 等^[1]在柬埔寨以公社为单元构建了人类福祉指数,并通过该指数精准定位当地迫切需要扶贫政策支持的区域,辅助进一步的工作实施。其次,人类福祉指数可以用于风险评估和管理,譬如,福祉指数可以作为自然灾害(如洪水、干旱、地震)对人类社会影响的综合评估指标。Das^[36]利用自然地理变量与社会经济变量构建综合福祉指数,以印度海岸区域的 262 个村庄为研究单元,定量评估了其对海啸的承受力与住户生命脆弱程度。Yang 等^[20]通过对四川卧龙大熊猫自然保护区的农户进行研究,探索了汶川地震对当地农户人类福祉指数的短期影响。Yang 等^[37]则进一步通过长期福祉问卷追踪调查,发现四川卧龙大熊猫保护区的农户福祉指数到 2014 年才恢复到地震前 2007 年的水平。最后,福祉指数可以用于研究生态保护与人类福祉之间、以及生态系统服务与人类福祉之间的关系。徐荣林等^[38]基于 Yang 等^[20]构建的福祉问卷对九寨沟国家级自然保护区内的居民福祉进行了评估,发现生态旅游所带来的社会和经济影响感知显著地提升了当地居民的主观福祉。朱杰等^[39]则应用 Yang 等^[20]构建的福祉指标体系对陕西佛坪国家级自然保护区居民福祉进行了长期(1995—2005、2005—2015)的定量历时性研究,结果表明,保护区居民福祉总体上有明显提升,而且 2005—2015 年阶段比 1995—2005 年提升幅度更大;除了健康方面随着年龄增加有显著下降,居民福祉在基本生活条件、安全、选择和行动的自由方面都显著提高。同时,徐荣林等^[38]和朱杰等^[39]的定量研究都表明 Yang 等^[20]构建的福祉指标体系具有较好的内部一致性和外部有效性。Sandhu 等^[40]在东喜马拉雅生物多样性较高的地区进行研究,探索福祉指数与当地生态系统服务的联系,从而为缓解当地贫困状况提供支持。Adams^[41]等在孟加拉国沿海三角洲地区进行研究,探索当地生态系统服务对人类福祉指数的影响,为制定当地减贫政策提供支持。

2 讨论

本文探讨了人类福祉评估的技术方法体系,着重介绍了改进的因子分析法。下面重点讨论改进的因子分析法相比传统因子分析法的优点和缺点。

首先,改进的因子分析法提供了一种普适、高效又实用的人类福祉综合指数评估方法。与传统的因子分析方法相比,这种方法通过理论设计与数据挖掘技术的结合,最大程度利用了指标的变异和提高了指数的内部和外部有效性。譬如,在柬埔寨的福祉研究中,改进的因子分析法在每个维度的内部一致性都得到了改善^[1]。

第二,改进的因子分析法不受尺度限制,可以用于任何尺度的分析单元(如个体、农户、乡镇尺度)。同时,改进的因子分析法不受划分的维度数量限制,既可以按照千年生态评估的框架划分为五个维度(即基本生活条件、安全、健康、良好的社会关系、选择和行动的自由),又可以根据实际需要划分成其他维度,如基本生活需求、环境需求、经济需求和主观幸福感^[18]。

第三,改进的因子分析法可以灵活设定权重系数。不管是每个福祉维度还是每个指标的权重系数,既可以根据数据本身的变异获得,也可以结合实际的情况(如管理的目标)自定义。这大大方便了福祉指数在不同尺度、不同生态社会经济背景下的应用。例如, Yang 等^[1]在柬埔寨公社尺度和汶川大地震对人类福祉影响时^[20],均有应用。

第四,改进的因子分析法在结构方程模型中考虑了单个指标的测量误差。因而与传统的因子分析法不同,改进的因子分析法不存在测量误差为零的潜在假设条件,指数模型结果比较稳健。这一优势意味着即便是数据质量不是那么好的二手数据也能应用改进的因子分析法获得相对较好的指数模型结果。考虑到大部分的福祉研究需要收集大量第一手的问卷调查数据,费时费力,成本很高。改进的因子分析法的这一优势使得利用现有的二手数据(尤其是统计数据)构建人类福祉综合指数成为可能。例如, Yang 等^[1]在柬埔寨公社尺度上利用统计数据构建了柬埔寨全国范围的人类福祉指数体系。

第五,与传统的因子分析法类似,改进的因子分析法产生的是一套福祉指数体系,既包括综合指数,又包括各维度的分指数。综合指数可以用于反映福祉整体的时空动态和格局,分指数则可以用于细化的各维度分

析。譬如,综合指数比较适用于大尺度的比较分析,但是不利于分析生态系统服务对福祉不同维度贡献之间的权衡与协同,也不利于揭示因地而异的局部机理^[9, 42]。

最后,与传统的因子分析法类似,改进的因子分析法对统计分析的要求较高,指数模型无法通过现有的统计软件用户界面直接导入数据获得结果,需要编写计算机程序实现,存在一定的技术难度。不过,笔者正试图开发相应的用户界面友好、操作简便的软件包,该软件包将植于现有的广泛应用的统计软件(如 R、Stata)上。希望在不久的将来,人类福祉评估的研究能得到越来越多的重视,为揭示生态系统服务与人类福祉之间耦合模式和机制奠定基础。

3 结论

人类福祉的定量评估对于研究生态服务与人类福祉的耦合模式与机制,以及量化生态保护与建设政策的社会经济综合效益有着重要意义。本文对人类福祉评估的理论基础与技术方法进行了系统地归纳与梳理,也引入相关的案例进行了分析阐述,并比较讨论了不同评估方法的优缺点。对于深入定量的研究,笔者重点推荐改进的因子分析法。未来应加强相应的软件包的开发,同时将定量的福祉指标应用于生态服务与人类福祉关系的研究,以及构建系统模型开展生态保护与建设政策对生态系统服务和人类福祉作用效应的评估与模拟,并探索其调控机理,更好地为政策管理提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Yang W, McKinnon M C, Turner W R. Quantifying human well-being for sustainability research and policy. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(4): 1-13.
- [2] Bottrill M, Cheng S, Garside R, Wongbusarakum S, Roe D, Holland M B, Edmond J, Turner W R. What are the impacts of nature conservation interventions on human well-being: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 2014, 3: 16.
- [3] Yang W, Dietz T, Liu W, Luo J Y, Liu J G. Going beyond the millennium ecosystem assessment: an index system of human dependence on ecosystem services. *PLoS One*, 2013, 8(5): e64581.
- [4] Sukhdev P, Wittmer H, Schröter-Schlaack C, Neßhöver C, Bishop J, Brink P T, Gundimeda H, Kumar P, Simmons B. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature; a Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB. *sustainability the journal of record*, 2010.
- [5] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, DeFries R S, Diaz S, Dietz T, Duraipappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [6] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [7] Leslie H M. A roadmap to nature's benefits. *Science*, 2011, 332(6035): 1264-1265.
- [8] Cao W, Wu D, Huang L, Liu L L. Spatial and temporal variations and significance identification of ecosystem services in the Sanjiangyuan National Park, China. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6151.
- [9] Villamagna A, Giesecke C. Adapting human well-being frameworks for ecosystem service assessments across diverse landscapes. *Ecology and Society*, 2014, 19(1): 11.
- [10] Vemuri A W, Costanza R. The role of human, social, built, and natural capital in explaining life satisfaction at the country level: toward a National Well-Being Index (NWI). *Ecological Economics*, 2006, 58(1): 119-133.
- [11] Jones B A. Invasive species impacts on human well-being using the life satisfaction index. *Ecological Economics*, 2017, 134: 250-257.
- [12] Bondarchik J, Jabłońska-Sabuka M, Linnanen L, Kauranne T. Improving the objectivity of sustainability indices by a novel approach for combining contrasting effects: Happy Planet Index revisited. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 400-406.
- [13] UNDP. Human Development Indices and Indicators: 2018 Statistical Update. New York; United Nations Development Programme, 2018.
- [14] Bagstad K J, Berik G, Gaddis E J B. Methodological developments in US state-level genuine progress indicators: toward GPI 2.0. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 474-485.
- [15] Duraipappah A K, Muñoz P. Inclusive wealth: a tool for the United Nations. *Environment and Development Economics*, 2012, 17(3): 362-367.
- [16] Durand M. The OECD better life initiative: *How's life?* and the measurement of well-being. *Review of Income and Wealth*, 2015, 61(1): 4-17.
- [17] Assessment M E. Ecosystems and Human Well-Being. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Yang W, Dietz T, Kramer D B, Chen X D, Liu J G. Going beyond the millennium ecosystem assessment: an index system of human well-being. *PLoS One*, 2013, 8(5): e64582.
- [21] Yang W, Dietz T, Kramer D B, Ouyang Z Y, Liu J G. An integrated approach to understanding the linkages between ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(5): 1-12.
- [22] Milner-Gulland E J, McGregor J A, Agarwala M, Atkinson G, Bevan P, Clements T, Daw T, Homewood K, Kumpel N, Lewis J, Mourato S, Fry B P, Redshaw M, Rowcliffe J M, Suon S, Wallace G, Washington H, Wilkie D. Accounting for the impact of conservation on human well-being. *Conservation Biology*, 2014, 28(5): 1160-1166.
- [23] 徐建英, 王清, 魏建瑛. 卧龙自然保护区生态系统服务福祉贡献评估: 当地居民的视角. *生态学报*, 2018, 38(20): 7348-7358.
- [24] Hori J, Makino M. The structure of human well-being related to ecosystem services in coastal areas: a comparison among the six North Pacific countries. *Marine Policy*, 2018, 95: 221-226.
- [25] Yang W, Lu Q L. Integrated evaluation of payments for ecosystem services programs in China: a systematic review. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2018, 4(3): 73-84.
- [26] Kaiser H F. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, 20(1): 141-151.
- [27] Handfield R, Walton S V, Sroufe R, Melnyk S A. Applying environmental criteria to supplier assessment: a study in the application of the Analytical Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 2002, 141(1): 70-87.
- [28] Partovi F Y, Burton J, Banerjee A. Application of analytical hierarchy process in operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 1990, 10(3): 5-19.
- [29] Nardo M, Saisana M, Saltelli A, Tarantola S. Tools for Composite Indicators Building. *Ispra: Institute for the Protection and Security of the Citizen*, 2005: 19-20.
- [30] Bollen K A, Noble M D. Structural equation models and the quantification of behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(S3): 15639-15646.
- [31] Cohen J. *Statistical Power ANALYSIS for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Hillsdale: Erlbaum Associates, 1988: 499-500.
- [32] 侯杰泰. 结构方程模型及其应用. 北京: 教育科学出版社, 2004.
- [33] White H J, Gaul W, Sadykova D, León-Sánchez L, Caplat P, Emmerson M C, Yearsley J M. Quantifying large-scale ecosystem stability with remote sensing data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2020, doi: 10.1002/rse2.148.
- [34] Scott J M, Davis F, Csuti B, Noss R, Butterfield B, Groves C, Anderson H, Caicco S, D'Erchia F, Edwards Jr T C. Gap Analysis: a Geographic Approach to Protection of Biological Diversity. 1993: 3-41.
- [35] Bian J, Ren H, Liu P. Evaluation of urban ecological well-being performance in China: a case study of 30 provincial capital cities. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120109.
- [36] Das S. The role of natural ecosystems and socio-economic factors in the vulnerability of coastal villages to cyclone and storm surge. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 531-546.
- [37] Yang H B, Dietz T, Yang W, Zhang J D, Liu J G. Changes in human well-being and rural livelihoods under natural disasters. *Ecological Economics*, 2018, 151: 184-194.
- [38] 徐荣林, 吴昱芳, 石金莲. 基于旅游感知视角的居民主观福祉影响因素研究——以九寨沟国家级自然保护区为例. *南京工业大学学报: 社会科学版*, 2017, 16(4): 104-114.
- [39] 朱杰, 卢春天, 石金莲, 张丽荣, 潘哲. 自然保护区居民福祉的历时性——以陕西佛坪国家级自然保护区为例. *生态学报*, 2019, 39(22): 8299-8309.
- [40] Sandhu H, Sandhu S. Linking ecosystem services with the constituents of human well-being for poverty alleviation in eastern Himalayas. *Ecological Economics*, 2014, 107: 65-75.
- [41] Adams H, Adger W N, Ahmad S, Ahmed A, Begum D, Matthews Z, Rahman M M, Nilsen K, Gurney G G, Streatfield P K. Multi-dimensional well-being associated with economic dependence on ecosystem services in deltaic social-ecological systems of Bangladesh. *Regional Environmental Change*, 2020, 20(2): 42.
- [42] Daw T, Brown K, Rosendo S, Pomeroy R. Applying the ecosystem services concept to poverty alleviation: the need to disaggregate human well-being. *Environmental Conservation*, 2011, 38(4): 370-379.