

# 浙江省钱塘江源区域山水林田湖草 生命共同体健康评价

苏敏, 虞方伯, 方晓波

(浙江农林大学 环境与资源学院/碳中和学院, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** [目的] 分析浙江省钱塘江源区域山水林田湖草生命共同体健康状况, 为国土空间规划和生态管理提供科学参考。[方法] 基于生命共同体理论与活力—组织力—恢复力(vitality-organization-resilience, VOR)生态模型理论, 构建生命共同体健康评价指标体系。利用3S技术和社会经济统计资料, 以县域为评价单元, 对钱江源区域山水林田湖草生命共同体的健康状况进行评价和分级。[结果] ①2020年, 钱江源区域的淳安县处于生命共同体健康状态, 建德市、开化县、常山县生命共同体均为亚健康状态。②2015—2020年4个县(市)生命共同体健康指数总体呈上升趋势, 健康指数上升趋势大小依次为: 建德市>常山县>淳安县>开化县。③2020年, 4县(市)中山水林田湖草子系统健康状态最好的为常山县, 最差的为淳安县; 生态系统健康状态最好的为淳安县, 最差的为常山县。④钱江源区域林、田子系统结构及其生态服务功能有待提升优化。⑤生态修复试点工程对于提升钱江源区域生命共同体健康状态在一定程度上起到了积极的推动作用。[结论] 钱江源区域山水林田湖草生态修复工程取得了阶段性成果。4县(市)接下来应对山、水、林、田、湖等子系统的不同问题开展相关修复工作, 同时进行统筹规划与生态整治, 实现山水林田湖草生命共同体系统的统筹共治、健康管理与持续经营。

**关键词:** 山水林田湖草; 生命共同体健康评价; VOR模型; 钱塘江源头; 浙江省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)01-0097-12

中图分类号: X826

**文献参数:** 苏敏, 虞方伯, 方晓波. 浙江省钱塘江源区域山水林田湖草生命共同体健康评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 97-108. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.011; Su Min, Yu Fangbo, Fang Xiaobo. Health evaluation of life communities of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in source area of Qiantang River in Zhejiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 97-108.

## Health Evaluation of Life Communities of Mountains-Rivers-Forests-Farmlands-Lakes-Grasslands in Source Area of Qiantang River in Zhejiang Province

Su Min, Yu Fangbo, Fang Xiaobo

(College of Environment and Resources/College of Carbon

Neutrality, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China)

**Abstract:** [Objective] The health status of the living community of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in source area of Qiantang River of Zhejiang Province were analyzed in order to provide scientific reference for land spatial planning and ecological management. [Methods] Based on life community theory and VOR (vitality-organization-resilience) ecological model theory, a health evaluation index system of life communities was constructed. Using 3S technologies and socioeconomic statistics, the health status of the life community in the Qiantang River source area was evaluated and graded (with the county as the evaluation unit). [Results] ① The life community health index of Chunan County in 2020 was classified as healthy, but the life community health indexes of Jiande City, Kaihua County, and Changshan County were classified as sub-healthy. ② From 2015 to 2020, the overall life community health index of the Qiantang River source area

收稿日期: 2023-05-08

修回日期: 2023-09-03

资助项目: 国家“十三·五”重点工程项目“浙江省钱塘江源头区域山水林田湖草生态保护修复工程试点项目”(ZJCGZF[2020]189); 浙江省重点研发项目(2021C03190); 杭州市科技发展计划项目(202203B23)

第一作者: 苏敏(1999—), 女(汉族), 山东省泰安市人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源与信息技术。Email: suminyaokuaille@163.com。

通信作者: 方晓波(1978—), 男(汉族), 浙江省临安市人, 博士, 副教授, 主要从事环境评价与管理的研究工作。Email: fangxb@Zafu.edu.cn。

showed an upward trend, and the upward trend decreased in the following order: Jiande > Changshan > Chun'an > Kaihua. ③ Among the four counties (cities) in the Qiantang River source area in 2020, Changshan County had the best health status for the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands subsystem, while Chun'an County had the worst health status. Chun'an County had the best health status for the ecosystem subsystem, while Changshan County had the worst health status. ④ The structure and ecological service function of the forests and farmlands subsystems in the Qiantang River source area needs to be improved and optimized. ⑤ The ecological restoration pilot project in the Qiantang River source area had played a positive role in improving the health status of the life community to some degree. [Conclusion] The ecological restoration pilot project of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in the Qiantang River source area has achieved various stages of results. The four counties (cities) should next carry out relevant restoration work to address the different problems of the mountains, rivers, forests, farmlands, and lakes subsystems. At the same time, governments should carry out comprehensive planning and ecological renovation in order to achieve more scientifically integrated governance, health management, and sustainable management for the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands community system.

**Keywords:** mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands; life community health assessment; VOR model; source area of Qiantang River; Zhejiang Province

在全球气候变化和生物多样性降低的大背景下,开展关于山水林田湖草生命共同体生态保护与修复方面的研究对于中国生态文明建设具有重要意义。通过对中国各个区域的山水林田湖草生命共同体健康进行评价,掌握其健康状态,有针对性地推进生态保护修复工作,促进中国生态环境的高质量发展。

目前专门针对山水林田湖草生命共同体健康评价的研究较少,且主要集中于中国。国外类似研究主要是生态系统健康评价领域,且大多集中在对生态系统健康评估框架的改进上<sup>[1]</sup>。例如 Pan Zhenzhen 等<sup>[2]</sup>认为经典的生态系统活力、组织、恢复力和生态系统服务评价框架(ecosystem services valuation framework)<sup>[3]</sup>忽略了人类活动对生态系统的影响,因而将人类对生态系统的需求纳入生态系统健康评估;Xiao Rui 等<sup>[4]</sup>则是基于土地利用/植被覆盖变化和景观生态学理论结合活力—组织力—恢复力(vitality-organization-resilience, VOR)评价框架构建了生态系统健康综合评价框架;Yu Weiwei 等<sup>[5]</sup>根据陆地生态系统健康评估研究开发了一个基于沿海海湾特定生态系统服务的综合生态系统健康评估框架并将其应用于两个典型的沿海海湾—胶州湾和大亚湾。

中国对于山水林田湖草生命共同体健康评价的研究也处在初期。吕思思等<sup>[6]</sup>以红枫湖地区的山水林田湖生命共同体为例,基于生命共同体基本状态以及其与人的协调性方面构建了健康评价体系;苏维词等<sup>[7]</sup>则是将人作为子系统列入生命共同体健康评价体系,并通过系统聚类分析,对重庆库区的健康状况进行评价。上述两篇文献从不同方面考虑了人为因

素的影响,但缺少对该区域的生态系统健康状况的判断。“山水林田湖草生命共同体”指的则是山水林田湖草各要素的协同性和有机联系,人类与山水林田湖草各要素相互作用、影响,形成一个整体关联的共同体<sup>[6]</sup>,那么受山水林田湖草各要素影响的生态系统也应与其形成一个相互关联的共同体。因此,本研究认为山水林田湖草生命共同体健康不仅要包含山水林田湖草人各子系统的健康状况,也要包括区域内生态系统的健康状况。在对于生态系统健康评价的众多研究中,经典 VOR 评价框架侧重于衡量生态系统完整性和自然生态系统质量,在实践中被广泛应用<sup>[8]</sup>,因此本研究基于 VOR 评价框架将生态系统健康评价引入山水林田湖草生命共同体健康评价体系之中。

本文将山水林田湖草生命共同体理论与 VOR 评价框架结合构建评价指标体系,运用熵值法<sup>[9-11]</sup>与综合指数法<sup>[12]</sup>确定指标权重,以浙江省钱塘江源区山水林田湖草生态保护修复工程试点的工程范围作为研究对象,县域作为研究单元,探究浙江省钱塘江源头区域生命共同体健康状况。

## 1 研究区概况

钱塘江是浙江省的母亲河,其南、北两源均发源于安徽省休宁县,南源的衢江(兰江)流经开化县和常山县,北源的新安江流经淳安县和建德市,最终在建德市的梅城汇合<sup>[13]</sup>。由于浙江省钱塘江源头区域山水林田湖草生态保护修复工程试点的工程范围只涉及开化、常山、淳安、建德 4 个县(市),故本研究只针对浙江省域内的区域,并称之为浙江省钱塘江源头区域(图 1)。

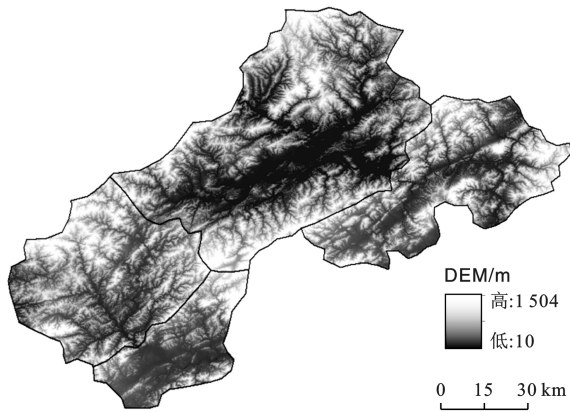


图 1 浙江省钱塘江源区域地形图

Fig.1 Topographic map in source area of Qiantang River in Zhejiang Province

浙江省钱塘江源区域(下文简称钱江源区域)位于浙江省西部(东经  $118^{\circ}01' - 119^{\circ}44'$ , 北纬  $28^{\circ}46' - 30^{\circ}02'$ ), 地处浙、赣、皖 3 省交界, 内有建德市、淳安县、开化县和常山县 4 个县(市), 2020 年年末常住人口约  $1.60 \times 10^5$ , 总面积约  $10\,066.74 \text{ km}^2$ , 占浙江省面积的 9.89%, 是国家重点生态功能区、长三角地区重要战略水源地和华东地区的重要生态屏障。钱江源区域属于亚热带季风气候, 植被属中亚热带常绿阔叶林北部亚地带, 年平均气温为  $17^{\circ}\text{C}$ , 四季分明, 雨量丰沛, 地形以丘陵为主且多高山陡坡, 汛期易发生泥石流、滑坡等地质灾害。域内部分地区人类活动强烈, 生态环境敏感, 水土流失面积大, 裸露地表多, 再加上其地处钦杭成矿带, 废弃矿山点多面广, 地质环境保护和恢复治理滞后, 致使区域内的地表植被、土壤均受到不同程度的破坏<sup>[14]</sup>。钱江源区域的水源安全问题尤其重要, 淳安县的千岛湖是中国特大型水库, 长三角最大的人工淡水湖, 在水资源安全保障、防洪减灾方面具有战略地位, 2019 年起, 为杭州等下游城市  $1.30 \times 10^7$  居民提供饮用水。由此可见钱江源区域的生态修复保护与经济矛盾的矛盾比较突出。

2018 年, 浙江省钱塘江源区域山水林田湖草生态保护修复工程试点(下文简称钱江源生态修复工程)获批成为第三批国家山水林田湖草生态修复工程试点。该生态修复工程主要涉及钱塘江北源的淳安县、建德市和钱塘江南源的开化县、常山县 4 县(市)的 7 大领域 79 个重点项目, 以水源涵养为基点, 以千岛湖和马金溪—常山港干流及主要支流为主体, 划分水土保持、生物多样性保护、土壤污染防治三大功能区, 统筹协调涉及农田、水体、森林、矿山等各要素的保护修复工作, 解决该区域各类生态环境问题<sup>[14]</sup>。通过治理, 钱江源区域环境质量和生态系统服务能力显著提高, 截至 2021 年 9 月已完成岸线治理  $446.00 \text{ km}$ , 废弃矿山治理面积  $20.01 \text{ km}^2$ , 水土流失治

理面积  $57.80 \text{ km}^2$ , 土地综合整治面积  $43.28 \text{ km}^2$ , 生物多样性保护治理面积  $32.12 \text{ km}^2$ , 重要生态系统保护修复面积  $51.53 \text{ km}^2$ 。识别该区域生态系统健康状况, 可为国土空间规划和生态管理提供科学参考, 可检验钱江源生态修复工程的实施效果, 对促进生态环境与社会经济协调发展具有重要指导意义。

## 2 研究方法与数据处理

### 2.1 山水林田湖草生命共同体健康评价指标体系

经过对相似度高、代表性强的文献[15-17]进行重点研究后, 基于科学性、综合性以及数据的可得性原则, 本研究从山水林田湖草人子系统健康状态和生态系统健康状态两个方面构建山水林田湖草生命共同体健康评价体系(见图 2)。

2.1.1 山水林田湖草人子系统健康状态评价指标构建 山水林田湖草人子系统健康状态由山、水、林、田、湖、草、人 7 个子系统组成。

(1) 山子系统。海拔较低、相对高差小、地面破碎化低的地方, 工农业生产规模较大, 人口较密集, 地表物质稳定性高, 滑坡、泥石流等自然灾害发生频次会少, 更有利于发展社会经济活动; 同时依据相关法律以及建设规范<sup>[18-19]</sup>, 区域面积内坡度(坡面的垂直高度和水平宽度的比)超过 25% 的面积越大, 城市建设、农业生产就会越受到限制。因此, 选取平均海拔、相对高差、25% 以上坡度覆盖率和沟壑密度作为山子系统的评价指标。

(2) 水子系统。降水量直接影响区域内河流的流量, 以及植被生长和农业生产方式; 供水量反映人类社会对水资源的需要以及对区域水环境的干扰程度; 污水排放量以及污水处理率则会直接影响河流以及地下水水质, 也反映出地区对生态环境重视的程度。因此, 选取降水量、供水量、污水排放量、污水处理率作为水子系统健康评价的指标。

(3) 林子系统。林地覆盖率直接反映出区域内林木种植的面积; 植被覆盖度是衡量生态环境治理、保护强度的重要评价指标; 林业产值可以较为直观地看到人类活动对林子系统的干扰情况。因此, 选取森林覆盖率、植被覆盖度、林业产值作为林子系统健康评价的指标。

(4) 田子系统。水田、旱地面积比重较大的区域, 粮食生产能力较强, 能养活更多的人口; 水田比旱田作物产量高, 粮食生产能力强, 对居民基本生活保障能力就越强; 粮食单产是反映粮食单位产出量的指标, 粮食单产越高耕地质量和耕地利用率越高。因此, 选取水田面积比例、旱地面积比例、水田占耕地比例、粮食总产量、粮食单产作为田子系统健康评价的指标。

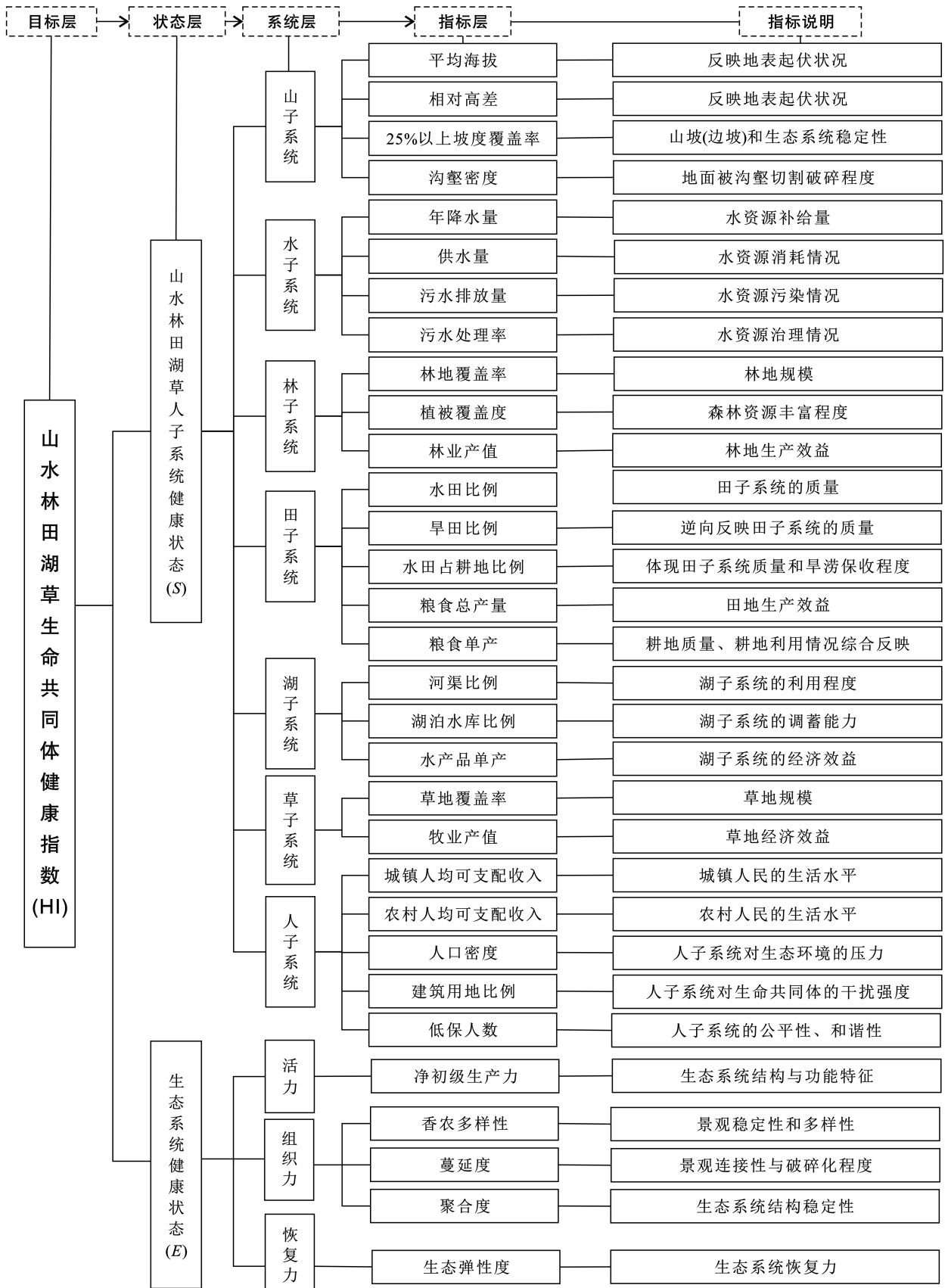


图 2 山水林田湖草生命共同体健康评价指标体系

Fig.2 Indicator system for evaluating health of the life community of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands

(5) 湖子系统。河流水渠越多,表明人们对湖泊、水库的利用率越高;河湖的面积变化会影响湖泊、水库的调蓄能力以及周围的局部小气候;水产品单产是指单位湖泊、水库面积中的水产品产量,可以从侧面反映养殖

区水域的生态状况。因此,选取河渠比例、湖泊、水库比例、水产品单产作为湖子系统健康评价的指标。

(6) 草子系统。通过种草提高草地覆盖率可减少水土流失,优化区域生态环境质量;但区域内超载放牧、毁草开荒等不合理的人类行为会对草子系统产生不良影响。因此,选择草地覆盖率、牧业产值作为草子系统健康评价的指标。

(7) 人子系统。城乡居民人均可支配收入越高,居民的生活水平和生活质量会得到提升,人民的环保意识也就越高;区域内的人口承载能力是有限的,人口密度越大对生命共同体产生不良影响的机会就越多;城市建设往往对生态环境造成负面影响,建设用地面积越大对环境造成的负面影响越多;最低生活保障人数是经济社会发展质量评估的一个重要指标,最低生活保障人数越少说明地区居民贫富差距越小,依赖政府救济的家庭少。因此,选取城镇居民人均可支配收入、人口密度、建设用地面积比例、城乡最低生活保障人数作为人子系统的评价指标。

**2.1.2 生态系统健康评价指标构建** 生态系统健康状态由生态系统活力、组织力以及恢复力 3 个子系统组成。“活力”子系统选择植被净初级生产力(net primary productivity,简称 NPP)作为评价指标,可以直接体现植被状态,与植物状态呈正相关<sup>[20]</sup>。“组织力”子系统用于表示生态系统的复杂性,主要体现在人类活动干扰和自然景观多样性这两方面<sup>[21]</sup>,但是由于山水林田湖草人子系统健康状态评价中已经将人的影响体现出来,因此只选用香农多样性指数、蔓延度以及聚合度作为“组织力”子系统的评价指标。对于“恢复力”子系统,生态弹性度越高表示生态系统恢复力越强,因此选择生态弹性度作为“恢复力”子系统的评价指标。

## 2.2 数据来源及处理

本研究使用的数据主要包括统计数据和空间数据,研究时间节点为 2015,2020 年。统计数据,包括人均可支配收入、人口密度、年降水量、林业产值等,主要收集自淳安县、建德市、衢州市相关年份统计年鉴和杭州市水利公报。空间数据(2015,2020 年)包括:①沟壑密度、相对高差、25%以上坡度覆盖率等数据来源于地理空间数据云平台的 GDEM V230 M 分辨率数字高程 DEM 数据;②林地覆盖率、河渠比、湖泊水库比、草地覆盖率、建筑用地面积比等数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台的土地利用数据;③植被覆盖度数据来源于 SPOT/VEGETATION 以及 MODIS 等卫星遥感影像计算得出的归一化植被指数(NDVI);④植被净初级生产力(NPP)数据来源于美国 NASA 网站,MOD17A3 MODIS 数据集。

本研究利用 ArcGIS 软件对数据进行处理,以县(市)为单元利用 DEM 数据提取坡度 $\geq 25^\circ$ 的地表单元面积,再除以各个县区的面积值,进而得到 25%以上坡度的植被覆盖率;基于 DEM 数据再经过 ArcGIS 软件解译处理统计出沟壑密度、相对高差、平均海拔;将置信区间设为 5%~95%对 NDVI 数据进行处理得到植被覆盖度数据;在 ArcGIS 软件中对土地利用数据进行处理,提取各类型土地面积再计算得到林地覆盖度、水田比例、旱地比例、水田占耕地比例、河渠比例、湖泊水库比例、草地覆盖率、建筑用地面积比例等数据。

本文的粮食单产、水产品单产数据经由统计年鉴得到的粮食总产量、水产品产量除以粮食播种面积、湖泊水库面积得出<sup>[6]</sup>;植被净初级生产力数据(NPP)经 ArcGIS 统计计算得到;香农多样性、蔓延度、聚合度以及生态弹性度数据是基于土地利用数据统计再经公式计算得出,香农多样性、蔓延度、聚合度、生态弹性度的计算公式分别为:

$$O_1 = -\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中: $O_1$ 为香农多样性数据值; $P_i$ 为研究区内第*i*种土地利用类型占土地总面积的比例。

$$O_2 = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[ P_{ij} \left( \frac{g_{ik}}{\sum_{i=1}^m g_{ik}} \right) \right] \left[ \ln P_i \left( \frac{g_{ik}}{\sum_{i=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln m} \right\} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $O_2$ 为蔓延度数据值; $P_i$ 为*i*类型斑块所占面积百分比; $g_{ik}$ 为*i*类型斑块和*k*类型斑块毗邻的数目; $m$ 为景观种的斑块类型总数目。

$$O_3 = \left[ \frac{f_{ij}}{\max \rightarrow f_{ij}} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中: $O_3$ 为聚合度数据值; $f_{ij}$ 为根据单一算法类型*I*相邻斑块数。

$$R = O_i \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i = \left( -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \right) \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \quad (4)$$

式中: $R$ 为生态弹性度数据值; $P_i$ 为第*i*类土地利用类型的面积比; $O_i$ 为多样性指数; $C_i$ 为第*i*类土地利用类型的生态恢复力值;本研究参考刘明华等<sup>[22]</sup>对不同的土地利用类型赋予生态恢复力值:耕地为 0.50,林地为 0.90,草地为 0.70,城镇用地为 0.40,水体为 0.95,其他为 0.10。

## 2.3 权重确定

本研究采用熵值法结合综合指数法构建评价指标体系。

首先将收集到的数据基于其指标类型对其进行归一化处理,计算公式为:

(1) 正向指标。

$$T_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} + 0.000\ 01 \quad (5)$$

(2) 负向指标。

$$T_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} + 0.000\ 01 \quad (6)$$

式中:  $T_{ij}$  为归一化后的结果值, 范围  $[0, 1]$ ;  $X_{ij}$  为样本值,  $\max X_{ij}$  为样本数据最大值;  $\min X_{ij}$  为样本数据最小值。

利用熵值法计算指标层第  $j$  项指标熵值:

$$h_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^n T_{ij}} \ln \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^n T_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $h_j$  为第  $j$  项指标的熵值;  $n$  为评价单元数。

确定指标层各指标权重, 计算公式为:

$$W_j = 1 - \frac{h_j}{\sum_{i=1}^n (1 - h_j)} \quad (8)$$

式中:  $W_j$  为第  $j$  项指标权重。

本研究采用综合指数法计算状态层和系统层权重, 将各子系统视为同等重要, 各子系统的权重均为  $1/7$ ; 将各生态系统评估因子视为同等重要, 各评估因子权重均为  $1/3$ ; 将子系统健康状态与生态系统健康状态视为同等重要, 权重均为  $1/2$ 。山水林田湖草生命共同体健康指数 (HI) 计算公式为:

$$HI = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{7} (M + W + F + P + L + G + A) + \frac{1}{3} (V + O + R) \right] \quad (9)$$

具体各子系统内指标权重值以及指标性质见表 1。

表 1 浙江省钱江源区域生命共同体健康评价指标权重

Table 1 Indicator weights for health evaluation of life community in Qiantang River source area of Zhejiang Province

目标层	状态层	系统层	指标层	序号	性质	权重
山水林田湖草生命共同体健康指数 (HI)	山水林田湖草生命共同体健康状态 (S)	山子系统 (M)	平均海拔	M <sub>1</sub>	负向	0.22
			相对高差	M <sub>2</sub>	负向	0.27
			25% 以上坡度覆盖率	M <sub>3</sub>	负向	0.28
			沟壑密度	M <sub>4</sub>	负向	0.23
		水子系统 (W)	年降水量	W <sub>1</sub>	正向	0.33
			供水量	W <sub>2</sub>	负向	0.30
			污水排放量	W <sub>3</sub>	负向	0.14
			污水处理率	W <sub>4</sub>	正向	0.23
		林子系统 (F)	林地覆盖率	F <sub>1</sub>	正向	0.4
			植被覆盖度	F <sub>2</sub>	正向	0.32
			林业产值	F <sub>3</sub>	负向	0.28
		田子系统 (P)	水田比例	P <sub>1</sub>	正向	0.21
			旱地比例	P <sub>2</sub>	正向	0.41
			水田占耕地比例	P <sub>3</sub>	正向	0.16
			粮食总产量	P <sub>4</sub>	正向	0.12
			粮食单产	P <sub>5</sub>	正向	0.10
		湖子系统 (L)	河渠比例	L <sub>1</sub>	正向	0.37
			湖泊水库比例	L <sub>2</sub>	正向	0.51
			水产品单产	L <sub>3</sub>	负向	0.12
		草子系统 (G)	草地覆盖率	G <sub>1</sub>	正向	0.69
			牧业产值	G <sub>2</sub>	负向	0.31
		人子系统 (A)	城镇人均可支配收入	A <sub>1</sub>	正向	0.26
			农村人均可支配收入	A <sub>2</sub>	正向	0.27
			人口密度	A <sub>3</sub>	负向	0.16
			建筑用地面积比例	A <sub>4</sub>	负向	0.18
低保人数	A <sub>5</sub>		负向	0.13		
活力 (V)	净初级生产力	V	正向	1.00		
生态系统健康状态 (E)	组织力 (O)	香农多样性	O <sub>1</sub>	正向	0.38	
		蔓延度	O <sub>2</sub>	正向	0.32	
		聚合度	O <sub>3</sub>	正向	0.30	
	恢复力 (R)	生态弹性度	R	正向	1.00	

### 2.4 等级划分评判标准

为准确对比描述钱江源区域山水林田湖草生命共同体健康状态及其特征,在前人研究的基础上<sup>[23-26]</sup>,结合钱江源区域的实际情况,根据生命共同

体健康评级指数值,将钱江源区域山水林田湖草生命共同体健康状态分为 5 个等级,分别为自然状态、健康、亚健康、疾病、崩溃,具体等级数值以及健康特征见表 2。

表 2 浙江省钱江源区域生命共同体健康评价标准

Table 2 Comprehensive evaluation standards for health of life community in Qiantang River source area of Zhejiang Province

健康指数值	状态等级	健康特征
$1.00 \leq HI \leq 0.75$	自然状态	山水林田湖草人 7 个子系统均状态良好且各个子系统之间极为稳定和谐,人地关系十分协调;生态系统十分稳定,生态服务功能十分强大,基本不受外界影响,几乎无生态异常区域,生态系统自我恢复能力极强,处于良性、可持续发展状态
$0.75 < HI \leq 0.55$	健康	山水林田湖草人 7 个子系统中大部分状态良好且各个子系统之间稳定和谐,人地关系处于比较和谐的状态;生态系统稳定,结构合理,受外界干扰小,且干扰后自我恢复能力强,生态服务功能强大,生态系统可持续发展格局健全
$0.55 < HI \leq 0.35$	亚健康	山水林田湖草人 7 个子系统中部分状态良好且各个子系统之间比较稳定,人类对自然环境有一定的干扰,干扰后自然生态系统易退化,自我恢复能力差,需要在人为作用下逐步恢复;生态系统比较稳定,但受外力影响大,可持续性差,生态敏感区面积广
$0.35 < HI \leq 0.15$	疾病	山水林田湖草人 7 个子系统中极少部分状态良好,人类对自然环境干扰较强,干扰后生态治理修复困难;生态系统很不稳定,生物多样性低,植被退化严重,生态系统自然恢复能力很差
$0.15 < HI \leq 0.00$	崩溃	山水林田湖草人 7 个子系统状态均较差,人类活动强烈干扰自然环境,生态治理、恢复举步艰难,生态逆转十分艰巨;生态系统极不稳定,植被极度退化,生态系统自然恢复能力极差,生物多样性极低,生态服务功能极为低下

## 3 结果与分析

### 3.1 山水林田湖草人子系统健康状态分析

基于图 3a 可知,淳安、建德、开化、常山 4 个县(市)的子系统健康状态总体向好发展,横向对比发现常山县子系统健康指数明显高于其余 3 个县(市),得益于该县草地覆盖率高,又没有大规模发展牧业破坏

草地,草子系统健康指数显著高于其余 3 个县(市)。

另外由于水子系统评价指数下降导致常山县成为浙江省唯一出现子系统健康评价指数下降的地区。子系统健康指数提升最大的是淳安县,其原因在于人子系统以及水子系统健康指数的显著提升。开化县子系统健康指数最低,原因在于山子系统的负面影响。

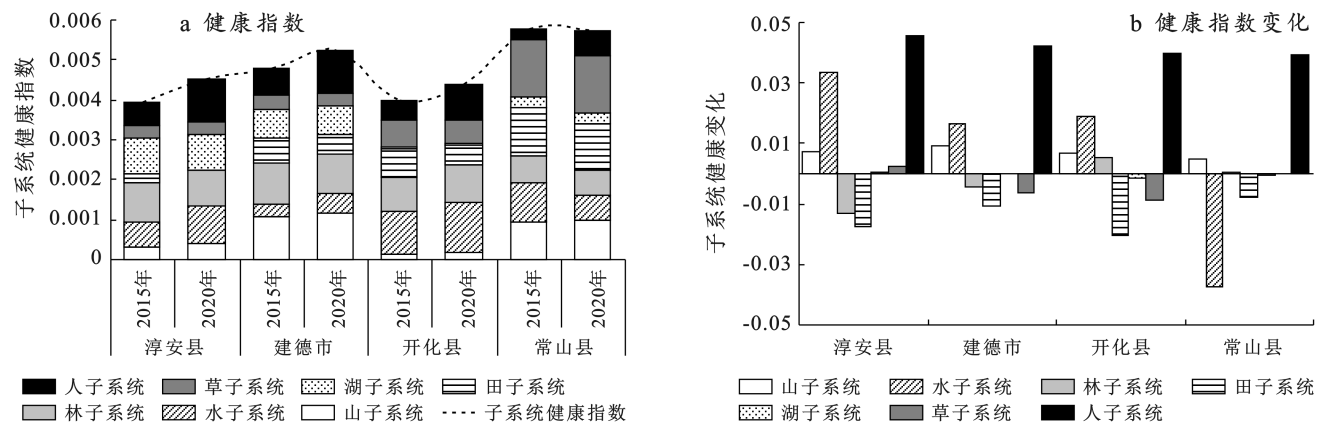


图 3 浙江省钱江源区域子系统健康指数及其变化

Fig.3 Subsystem health index and its change in Qianjiang River source area of Zhejiang Province

基于图 3b 发现,4 县(市)山子系统健康指数都有一定提升;除常山县外,其余 3 个县(市)水子系统健康指数均有明显提升,调查发现虽然常山县 2015—2020 年污水排放量明显降低并且污水处理率也有所提升,但水子系统健康指数提升不明显(或有

所下降),初步分析认为造成该县水子系统健康指数下降的主要原因是 2020 年降雨量明显少于 2015 年降雨量,导致 2020 年水资源补给量下降,影响了水子系统健康指数;对于林子系统,4 个县(市)则出现了两好两坏的情况,调查淳安县以及建德市的林子系统





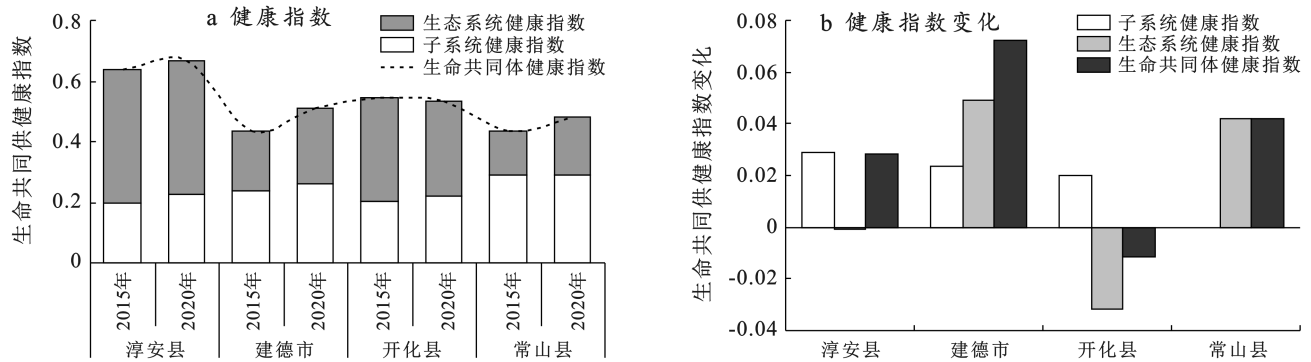


图 5 浙江省钱塘江源区域生命共同体健康指数及其变化

Fig.5 Life community health index and its change in Qianjiang River source area of Zhejiang Province

自 2018 年浙江省钱塘江源区域被列为山水林田湖草生态修复工程试点以后,淳安、建德、开化、常山 4 县(市)开展了涉及钱塘江整个区域岸上岸下、上游下游的 7 大领域 79 个重点项目建设,对 4 县(市)生命共同体健康水平的提升起到了关键性作用。

3.4.1 流域水环境保护治理 流域水环境治理是钱江源生态修复工程的特色,4 县(市)通过河道综合整治、污水零直排、智慧环保等项目建设达到对该区域江河湖泊等水体生态修复的目的。经过整治修复钱江源区域水子系统健康状态有所改善,4 县(市)水子系统健康指数共提升 0.015。值得注意的是,虽然常山县也开展了农村饮水达标提标、龙绕河流域综合治理、零直排小区改造等水环境治理工程建设,但是 2020 年常山县水子系统健康指数仍较 2015 年指数低 0.019,推测主要原因是 2020 年降雨量显著低于 2015 年导致健康指数降低,后续应对常山县水子系统多个年份进行评价,避免异常环境变化影响评价结果。

湖子系统健康指数变化也会体现钱江源区域流域水环境治理情况,但就评价结果来看,2015—2020 年钱江源区域湖子系统健康指数出现轻微下降,原因在于开化县以及常山县两个县的湖子系统健康指数均出现下降情况。分析数据发现两县均出现湖泊河渠水库面积未增加但是水产品产量大幅度提升的现象,因此两县湖子系统评价指数下降。钱江源生态修复工程中并未有拓宽水域面积的项目,因此两县水域面积并未出现较大变化,但是在此基础上水产品产量的大幅提升也是值得注意的问题,当地政府还应考虑在当地河流湖泊水库大量捕捞、密集养殖是否会对当地水域生态造成破坏。

3.4.2 矿山生态修复以及污染与退化土地修复治理

矿山生态修复主要通过矿山生态环境治理恢复、尾矿库治理工程达到对遗留未完全治理到位的废弃矿山及裸露山体的生态修复、降低水土流失的目的。污

染与退化土地修复治理主要通过农业面源污染治理、生态循环农业项目推广、农用地超标点位对账销号等手段达到水源涵养、水土保持的目的。这两类项目的实施结果主要体现在钱江源区域山、水子系统健康指数的提升上,尤其是 4 县(市)的山子系统健康指数经过修复治理均有提升,可见修复治理工程取得了一定的成效。

3.4.3 重要生态系统保护修复 重要生态系统保护修复主要通过森林生态修复、森林彩化提升改造、森林质量精准提升、林业有害生物防控等工程措施的实施,达到提高林地保有量和森林覆盖率、减少水土流失、优化森林结构的目的。重要生态系统保护修复中的重要生态系统主要指森林生态系统,本文主要体现在钱江源区域林子系统健康指数的变化上。但是根据评价结果却得出钱江源区域林子系统健康指数稍有降低,分析数据发现 4 县(市)林地覆盖率、植被覆盖度均未显著提升,尤其是 4 县(市)的林地覆盖率均出现下降情况,但是在此基础上 4 县(市)的林业产值却都有所提升。基于评价结果与分析可以看出钱江源区域森林生态系统保护修复并未取得较好的效果,森林生态修复与建设速度赶不上林地的砍伐与破坏速度,要求当地政府必须重视林业、建筑业等行业的发展与森林生态系统建设的平衡。

3.4.4 土地综合整治 土地综合整治主要通过垦造水田、高标准农田建设、建设用地复垦等工程措施增加耕地面积,提高农田的农业生产条件。但是 4 县(市)田子系统的健康指数却均出现降低,分析数据发现钱江源 4 县(市)2015 至 2020 年水田、旱地占地区面积略有下降,并且四县市粮食产量均出现大幅度下降。基于此评价结果可以看出,耕地建设速度仍赶不上耕地流失速度,保护耕地仍需努力,当地政府必须重视耕地面积保护与耕地质量提升,调查当地粮食产量下降的原因,及时采取措施提升耕地质量与粮食产量。

3.4.5 生物多样性保护及其他 生物多样性保护主要通过建设植物园、国家公园、自然保护区等来完善生态管护体系、落实生态修复职责、保护本地珍贵种质资源、增加生物多样性、提升县域生态环境。其他主要指常山国际慢城建设,这项工程对区域生态环境改善起到积极作用,长远来看也有助于提高区域旅游竞争力,带动当地居民就业。上述工程建设有助于区域生态系统健康状态的提升,基于生态系统健康评价结果可以看出,2015—2020 年钱江源区域生态系统健康指数提升了 0.058,初步推断山水林田湖草生态保护修复各项工程建设必然起到了诸多积极作用。

另外,所有钱江源生态修复工程建设项目都与人子系统有着密切联系,以山水林田湖草生命共同体的理念,推进中国重要区域的生态系统综合整治、修复与健康,最终目的都是人与自然和谐发展。2015—2020 年钱江源区域人子系统健康状态均有提升,说明钱江源区域生态修复工程项目的实施并非是舍弃经济发展,而是探讨人与自然两方并进,共同发展的新途径。

## 4 结论

本文以浙江省钱江源区域(淳安县、建德市、开化县、常山县)山水林田湖草生态保护修复工程试点为案例,建立基于山水林田湖草人子系统健康状态、生态系统健康状态的生命共同体健康评价体系,经过分析得出以下结论。

(1) 淳安、建德、开化、常山 4 个县(市)生命共同体健康等级分别为健康、亚健康、亚健康、亚健康,在 2015—2020 年时段除开化县外其他县(市)的生命健康指数均有提升,但是健康等级没有发生变化。

(2) 山水林田湖草人子系统健康指数最高的是常山县,得益于草子系统的健康状况显著高于另外 3 个县(市);生态系统健康指数最高的是淳安县,得益于该县生态系统活力、组织力、恢复力较高。

(3) 钱江源区域 4 县(市)域内田子系统健康指数均出现下降情况,应及时调查,针对问题提出有效对策,提升田地质量。

(4) 钱江源生态修复工程对于钱江源区域生命共同体健康状态提升在一定程度上起到了积极的推动作用。

## 5 讨论

浙江省钱江源区域是长三角地区重要的生态涵养区,具有较强的生态恢复力,但日益严峻的资源利用压力对该区域的山水林田湖草生态可持续性带来

了挑战。山水林田湖草生命共同体健康评价研究能更为全面具体地揭示区域内生态保护修复的关键问题,对区域山水林田湖生命共同体修复、维护与改善工作有重要现实指导意义。

基于研究结果,现对钱江源区域未来生态保护修复提出建议:①着重关注钱江源区域各县(市)耕地面积与质量提升,分析粮食产量下降的原因,运用科学手段提升田地质量。②对于开化县与淳安县的部分相对高差较大区域,应根据实地状况,制定水土保持方案,避免山体滑坡、泥石流等自然灾害。③关注导致土地利用变化的工程项目,进行环境影响评价,制定合理土地利用开发方案,保证后续周边生态环境恢复。④重视域内大型湖泊水库建设以及水质安全,发挥其蓄洪调水功能,进一步重点关注淳安县千岛湖水源安全,保障下游居民用水安全。⑤改善林分结构,提升林地质量,重视提升植被覆盖面积,尤其对于淳安县以及建德市应当注意维持当地林业发展与林地生长的平衡。

山水林田湖草生命共同体是一个统一、联系的整体。笔者以自身理解从山水林田湖草人子系统基本状态与生态系统健康状态两方面构建山水林田湖生命共同体健康评价体系,评价体系指标较多,相关数据收集困难,还需继续补充完善修改评价指标体系。本研究对于山水林田湖草人子系统以及生态系统两部分所选的指标中是否具有包含及重复的关系,只考虑了人为影响这一方面,具有一定的局限性,未来还应深入研究山水林田湖草人各子系统之间的相互影响以及其与生态系统健康之间的关系。

本研究结果受政府统计数据、DEM 数据、土地利用数据等数据精确性的控制,由于研究开展时淳安县统计年鉴仅查询到 2016—2020 年统计年鉴的客观条件限制,本研究只能选取 2015—2020 年 5 年的钱江源区域生命共同体健康状态开展调查(淳安县 2015 年相关数据由 2016 年淳安统计年鉴中得到),时间维度较短,不能深入分析钱江源区域生命共同体时间变化状况。并且,本文研究区域仅局限在钱江源生态修复工程的 4 县(市)范围之内,研究样本点数较少。此外,本研究指标选择多依据相关文献,指标选择较为粗浅,例如人子系统指标仅选择了人均可支配收入、建设用地面积比等指标,未考虑收入结构、产业结构等对于人子系统的影响。今后可以进一步从空间维度以及时间维度扩展研究范围,同时也可以从细化评价指标方面开展相关研究。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Styers D M, Chappelka A H, Marzen L J, et al. Developing

- a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010,94(3/4):158-165.
- [2] Pan Zhenzhen, He Jianhua, Liu Dianfeng, et al. Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River economic belt, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,774:144837.
- [3] Bao Zhongcong, Shifaw E, Deng Chengbo, et al. Remote sensing-based assessment of ecosystem health by optimizing vigor-organization-resilience model: A case study in Fuzhou City, China [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 72:101889.
- [4] Xiao Rui, Liu Yue, Fei Xufeng, et al. Ecosystem health assessment: A comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, Eastern China [J]. *Ecological Indicators*, 2019,98:363-376.
- [5] Yu Weiwei, Zhang Dian, Liao Jianji, et al. Linking ecosystem services to a coastal bay ecosystem health assessment: A comparative case study between Jiaozhou Bay and Daya Bay, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135:108530.
- [6] 吕思思, 苏维词, 赵卫权, 等. 山水林田湖草生命共同体健康评价: 以红枫湖区域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(8):1987-1997.  
Lv Sisi, Su Weici, Zhao Weiwan, et al. Life community health evaluation of mountains, rivers, forests, farmland and lakes: Taking Hongfeng Lake as an example [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019,28(8):1987-1997.
- [7] 苏维词, 杨吉. 山水林(草)田湖草生命共同体健康评价及治理对策: 以长江三峡水库重庆库区为例[J]. *水土保持通报*, 2020,40(5):209-217.  
Su Weici, Yang Ji. Health assessment and countermeasures on mountains-rivers-forests (grasslands)-farmlands-lakes-human life communities: A case study at Chongqing area of Three Gorges Reservoir of Yangtze River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(5):209-217.
- [8] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering [J]. *Ecological Engineering*, 2012,45:24-29.
- [9] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. *统计与决策*, 2015(2):12-15.  
Zhu Xian, Wei Guodong. Discussion on the excellent standard of dimensionless method in entropy method [J]. *Statistics & Decision*, 2015(2):12-15.
- [10] 傅琳琳, 毛晓红, 毛小报, 等. 浙江省 2013—2018 年粮食综合生产能力评价[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(9):1748-1758.  
Fu Linlin, Mao Xiaohong, Mao Xiaobao, et al. Evaluation of comprehensive grain production capacity in Zhejiang Province in 2013—2018 [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021,33(9):1748-1758.
- [11] 高登. 基于 PSR 模型和熵权法的临沂市城市土地集约利用评价[J]. *科学技术创新*, 2022(29):18-22.  
Gao Deng. Evaluation of urban land intensive use in Linyi city based on PSR model and entropy power method [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2022(29):18-22.
- [12] 周博, 杜晓霞, 马林兵, 等. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康动态评价[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018,57(4):9-15.  
Zhou Bo, Du Xiaoxia, Ma Linbing, et al. Dynamic health evaluation of land use system based on the pressure-state-response model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2018,57(4):9-15.
- [13] 夏芳. 钱塘江流域气候变化及其对水文径流的影响[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2016.  
Fang Xia. Climate change in the Qiantang River basin and its influence on local runoff [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2016.
- [14] 叶艳妹, 林耀奔, 刘书畅, 等. 山水林田湖草生态修复工程的社会-生态系统(SES)分析框架及应用: 以浙江省钱塘江源头区域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23):8846-8856.  
Ye Yanmei, Lin Yaoben, Liu Shuchang, et al. Social-ecological system (SES) analysis framework for application in ecological restoration engineering of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands: Utilizing the source area of Qiantang River in Zhejiang Province as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(23):8846-8856.
- [15] 熊小菊. 广东西江流域山水林田湖草时空变化及其生命共同体健康评价研究[D]. 广西 南宁: 南宁师范大学, 2020.  
Xiong Xiaojie. Spatial and temporal changes of mountains, rivers, forests, farmland, lakes and grasslands and the health evaluation of life community in the Xijiang River basin of Guangxi [D]. Nanning, Guangxi Nanning Normal University, 2020.
- [16] 吕思思. 红枫湖周边“山水林田湖”生命共同体健康评价[D]. 贵州 贵阳: 贵州师范大学, 2018.  
Lu Sisi. Health Assessment of life community of mountains, rivers, forests, farmland and lakes surrounding Lake Hongfeng [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2018.
- [17] 杨吉. 基于县域尺度的三峡库区(重庆段)山水林田湖生命共同体健康研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.  
Yang Ji. Life Community health evaluation of mountains,

- rivers, forests, farmland and lakes of Three Gorges reservoir area (Chongqing) based on country scale [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2017.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设用地竖向规划规范: CJJ 83—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for vertical planning on urban and rural development land: CJJ 83—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [19] 中华人民共和国水土保持法 [J]. 中国水土保持, 2011 (1): 1-5.  
People's Republic of China (PRC) soil and water conservation law [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(1): 1-5.
- [20] 李佳豪, 罗洁, 徐勇, 等. 基于 VOR 模型的广西 2014 与 2019 年生态健康时空变化特征研究 [J]. 无线电工程, 2021, 51(10): 1134-1141.  
Li Jiahao, Luo Jie, Xu Yong, et al. Research on the spatiotemporal characteristics of ecological health in Guangxi in 2014 and 2019 based on VOR model [J]. Radio Engineering, 2021, 51(10): 1134-1141.
- [21] 周启刚, 彭春花, 刘栩位, 等. 基于 VOR 模型的三峡库区消落带 2010—2020 年生态系统健康评价 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 310-318.  
Zhou Qigang, Peng Chunhua, Liu Xuwei, et al. Ecosystem health assessment of water level fluctuating zone in Three Gorges Reservoir area based on VOR model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 310-318.
- [22] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价 [J]. 地理研究, 2006, 25(5): 930-938.  
Liu Minghua, Dong Guihua. Ecosystem health assessment and driving force analysis in Qinhuangdao area based on RS & GIS [J]. Geographical Research, 2006, 25(5): 930-938.
- [23] 黄思敏, 胡宝清, 张中秋, 等. 山水林田湖海多维测度环境影响与时空分异: 以广西北部湾为例 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 369-377.  
Huang Simin, Hu Baoqing, Zhang Zhongqiu, et al. Multi-dimensional measurement of landscapes, forests, fields, lakes and seas, and spatiotemporal differentiation: A case study for the beibu gulf of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 369-377.
- [24] 谭彩荷, 赵伟, 蔡强, 等. 基于 PSR 模型的生态系统健康评价: 以三峡库区重庆段为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(3): 713-720.  
Tan Caihe, Zhao Wei, Cai Qiang, et al. Ecological system health evaluation based on PSR model: Taking Chongqing section of Three Gorges reservoir as an example [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(3): 713-720.
- [25] 李政, 何伟, 杨皎, 等. 基于 GIS 格网模型的长江上游山丘区国土利用生态健康评价: 以四川省宜宾市为例 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2020, 43(3): 417-426.  
Li Zheng, He Wei, Yang Jiao, et al. Ecological health assessment of land use in the upper reaches of the Yangtze River based on GISGrid model: Take Yibin in Sichuan Province as an example [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 43(3): 417-426.
- [26] 连琳琳, 张丽萍, 陆芳春, 等. 瓯江源头区生态健康评价及其影响因素分析 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2015, 42(5): 567-574.  
Lian Linlin, Zhang Liping, Lu Fangchun, et al. Eco-health assessment and its impact factors in the headstream area of Oujiang Basin [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2015, 42(5): 567-574.