



•研究报告•

基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估： 以钱江源国家公园体制试点区为例

孙孝平¹ 李 双¹ 余建平³ 方彦君⁴ 张银龙^{1*} 曹铭昌^{2*}

1 (南京林业大学, 江苏省南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

2 (生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

3 (钱江源国家公园生态资源保护中心, 浙江开化 324300)

4 (浙江省开化县环境保护局, 浙江开化 324300)

摘要: 土地利用变化是生物多样性与生态系统服务变化的主要原因之一。评估土地利用变化对生物多样性与生态系统服务影响对于政府决策具有重要作用。钱江源国家公园体制试点区是钱塘江的源头, 也是国家的重点生态功能区。本研究以钱江源国家公园体制试点区为研究区, 首先设计自然发展情景、规划情景、生态保护情景和开发利用情景等4种2025年不同土地利用变化情景, 随后采用InVEST模型和CLUE-S模型分析不同情景下钱江源国家公园水资源供给、涵养水源、固碳释氧、土壤保持、环境净化和生境质量等生态系统服务及其价值变化。结果表明: (1)核心保护区和生态保育区的生态系统服务价值占钱江源国家公园总价值的88.30%。(2)生态保护情景下钱江源国家公园生态系统服务价值最高, 有129.17亿元; 规划情景下生态系统服务价值次之, 有126.92亿元。(3)规划情景下钱江源国家公园水资源供给服务优于生态保护情景, 其他生态系统服务则次于生态保护情景。考虑到钱江源国家公园为下游提供重要的水资源这一功能, 将规划情景作为试点区2025年最优的土地利用变化情景。

关键词: 生态系统服务; 土地利用变化情景; InVEST模型; CLUE-S模型

Evaluation of ecosystem service value based on land use scenarios: A case study of Qianjiangyuan National Park pilot

Xiaoping Sun¹, Shuang Li¹, Jianping Yu³, Yanjun Fang⁴, Yinlong Zhang^{1*}, Mingchang Cao^{2*}

1 Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing 210042

3 Center of Ecology and Resources, Qianjiangyuan National Park, Kaihua, Zhejiang 324300

4 Kaihua Environmental Protection Bureau, Kaihua, Zhejiang 324300

Abstract: Land use change is one of the main drivers to change of biodiversity and ecosystem services. It is important for decision-making of government to assess impacts of land use change on biodiversity and ecosystem service. The Qianjiangyuan National Park pilot (QNPP), located at the headwaters of the Qiantang River, covers 252 km², and it is also a National Key Ecological Function Zone. In this study, We designed four land use change scenarios in 2025 for QNPP, i.e., business as usual, strategic planning, ecological protection, and development. Furthermore, the change in ecosystem services and its value in QNPP were evaluated under four scenarios by InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) model and CLUE-S (Conversions of Land Use and its Effects at Small Regional Extent) model. The ecosystem services in this assessment include water yield, water conservation, carbon sequestration and oxygen release, soil conservation, environmental purification, and habitat quality. Our results show that: (1) the value of ecosystem services in core protected areas and ecological conservation areas accounts for

收稿日期: 2018-07-02; 接受日期: 2018-12-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0507202; 2017YFC050380604)、中央级公益性科研院所基本科研业务专项(县市自然资源资产负债表编制技术与示范)、福建省环保科技计划“福建省生物多样性保护网络优化技术研究(2017R027)”和江苏高校优势学科建设工程资助项目

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: ecoenvylz@163.com; caomingc@163.com

88.30% of total value of QNPP; (2) the value of ecosystem services of QNPP in the ecological protection scenario is the highest (12.917 billion RMB yuan), and ranks the second in the strategic planning scenario (12.692 billion RMB yuan); and (3) the water yield in the strategic planning scenario is superior to that in the ecological protection scenario, while other ecosystem services are inferior to that in the ecological protection scenario. Strategic planning scenario is an optimal land use strategy in 2025 since QNPP play a key role in providing water resources for the downstream.

Key words: ecosystem service; land use change scenarios; InVEST model; CLUE-S Model

生态系统服务是指生态系统与生态过程中所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用(MA, 2005), 它不仅为人类提供食物、淡水及其他工农业生产的原料, 更重要的是维持了地球生命支持系统(MA, 2005; 李屹峰等, 2013)。土地利用变化是生态系统服务变化的重要驱动力之一(Polasky et al, 2011), 土地利用方式的变化可以改变生态系统类型、格局以及生态过程, 直接影响生态系统服务(Swetnam et al, 2011)。如城市化发展、农业和资源开发等在增加生态系统供给服务功能的同时降低了生态系统调节功能(Delphin et al, 2016; Jiang et al, 2016; Cao et al, 2017; Gao et al, 2017); 退耕还林还草等土地政策的实施则增加了生态系统调节服务功能(Li et al, 2015; Zheng et al, 2016; Wang et al, 2017; Sun et al, 2018)。因此, 通过与利益相关者的协商和互动(如地方政府和生态保护职能部门等), 将未来土地利用变化或土地利用规划目标等设计成若干个变化情景, 利用情景分析法定量评估土地利用变化与生态系统服务变化之间的关系, 已成为当前生态学研究的热点之一(Butler et al, 2013; Goldstein et al, 2015; Gao et al, 2017; Lacher et al, 2018)。如Polasky等(2011)根据明尼苏达州土地利用演化规律, 设计了5种土地利用情景, 并对其生态系统服务价值进行分析, 发现大规模农业扩张情景下, 会获得最多的经济报酬, 却造成碳储量丧失、水体质量下降以及生物多样性价值下降; Butler等(2013)设计了澳大利亚大堡礁不同土地利用情景, 通过模拟分析其水质调节功能与其他生态系统服务之间的权衡利益关系, 发现水质的好坏直接影响其渔业生产; 黄焕春等(2013)通过情景模拟法分析了天津市不同土地利用情景下生态系统服务价值的空间演变规律, 结果表明不同城市扩展模式引起的生态系统服务价值及空间变化存在差异。

国家公园这一概念最早由美国艺术家George Catlin提出。目前, 国际上有一些学者采用情景分析法评估了未来土地利用变化对国家公园生态系统服务的影响。如Mukul等(2017)设计了孟加拉国Satchari国家公园2025年两种土地利用情景(土地退化情景和土地恢复情景), 并评估了土地利用方式变化对生态系统的支撑功能、供给功能、调节功能和文化功能的影响; Lacher等(2018)以2011年美国弗吉尼亚州谢南多厄国家公园的土地利用为基线, 预测了2061年两种土地利用情景下水质净化和水源供给能力; Ramachandra (2018)等基于CA-Markov模型预测了2026年Kudremukh国家公园的土地利用方式, 并评估了其对生物多样性、气候、水文和生态的影响。我国国家公园体制建设起步较晚, 于2015年才提出了《建立国家公园体制试点方案》, 并在9个省市开展了国家公园体制试点(He et al, 2018)。2016年6月, 钱江源国家公园体制试点区(以下简称钱江源国家公园)正式由国家发改委批准, 成为全国范围内第四个国家公园体制试点。

目前, 国内对国家公园体制试点区生态系统服务的研究较少, 本研究拟以钱江源国家公园为研究区域, 首先采用情景分析法, 通过与开化县环境保护局协商并参考国家公园相关规划文本, 设计了钱江源国家公园2025年4个不同土地利用情景。随后利用生态系统服务评估模型InVEST和土地利用变化模型CLUE-S, 评估了2025年不同土地利用情景对钱江源国家公园生态系统服务价值的影响(Nelson et al, 2009; Sun et al, 2018), 以期对钱江源国家公园生态系统保护与管理提供科学依据。

1 研究区域

钱江源国家公园位于浙皖赣三省交界处开化县境内(29°10'–29°26' N; 118°03'–118°21' E), 是浙江省第一大河钱塘江的源头所在地, 总面积约为252 km²,

占浙江省开化县总面积的11.27%, 其中, 核心保护区面积约为72.31 km², 生态保育区面积约为134.59 km², 游憩展示区面积约为8.14 km², 传统利用区面积约为36.96 km², 涉及开化县苏庄镇、长虹乡、何田乡和齐溪镇共4个乡镇、19个行政村、72个自然村, 9,744人(《钱江源国家公园体制试点区总体规划2016–2025》)。钱江源国家公园属中亚热带季风气候区, 受夏季风影响较大, 四季分明、降水充沛、气候温和、无霜期长, 区域内地形复杂, 构成了丰富多样的小气候环境, 区内年平均降雨量为1,963 mm, 年平均气温16.2℃, 无霜期达252 d, 年平均日照时数1,334.1 h(黄进等, 2010)。区内有古田山国家级自然保护区、钱江源国家森林公园和钱江源省级风景名胜区, 森林覆盖率达81.7%, 动植物物种数达2,230种, 其中有黑鹿(*Muntiacus crinifrons*)、白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)、亚洲黑熊(*Ursus thibetanus*)等国家重点保护动物34种; 香果树(*Emmenopterys henryi*)、野含笑(*Michelia skinneriana*)、紫茎(*Stewartia sinensis*)等32种珍稀濒危植物(《钱江源国家公园体制试点区总体规划2016–2025》)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究数据主要包括土地利用、气候、辐射、土壤、高程和社会经济数据等, 其中2010和2015年土地利用数据来源于生态环境部/中国科学院“全国生态状况变化(2010–2015)调查与评估”项目, 土地利用类型为阔叶林、针叶林、针阔混交林、灌木林、园地、草丛、水田、旱地、水域、建设用地和裸地(图1); 气候数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>), 选取钱江源国家公园周边27个国家一级和二级气象站点的1981–2010年降水和温度数据, 用“克里斯插值”处理相关数据; 辐射数据来源于NASA官网(<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>); 土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所, 包括土壤砂粒含量、粉粒含量、粘粒含量、有机质含量和土壤深度等; 高程数据来源于国家空间地理信息云数据(<http://www.gisccloud.cn/>), 空间分辨率为30 m; 社会经济数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台

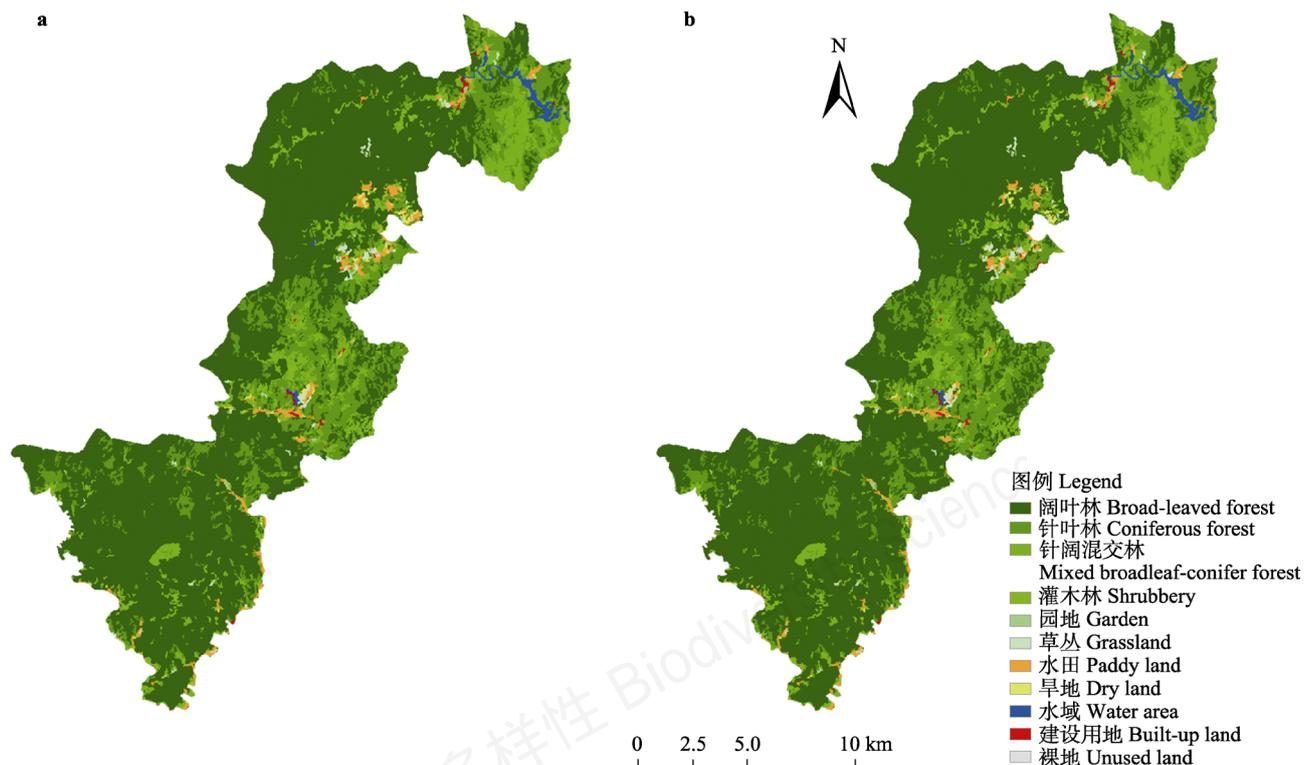


图1 钱江源国家公园土地利用类型图。(a) 2010年; (b) 2015年。

Fig. 1 Land use and land cover of the Qianjiangyuan National Park pilot. (a) 2010; (b) 2015.

(<http://www.geodata.cn>); 碳密度数据、泥沙去除效率和氮、磷去除率数据、威胁因素数据来源于文献(张骏等, 2010; Polasky et al, 2011; Tallis et al, 2011; 钱逸凡等, 2012)。

2.2 生态系统服务价值评估方法

本研究在TEEB (The Economic of Ecosystems and Biodiversity)分类的基础上, 定量评估钱江源国家公园生态系统服务中供给服务(水资源供给)、调节服务(涵养水源、固碳释氧、土壤保持和环境净化)和栖息地服务(生境质量)的物质质量及其价值量。

2.2.1 水资源供给

水资源供给采用InVEST模型中产水量模块, 其基本原理如下(Tallis et al, 2011):

$$Y_{xj} = P_x - AET_{xj} \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为土地利用方式 j 中单元格 x 上的年产水量(mm), P_x 为单元格 x 上的年均降水量(mm), AET_{xj} 为土地利用方式 j 中单元格 x 上的年实际蒸散量(mm)。钱江源国家公园是钱塘江的源头, 为下游的杭州市提供水资源, 因此, 水资源价格采用朱永彬等(2018)一文中的杭州市水价数据, 价格为11.67元/t。

2.2.2 涵养水源

在InVEST模型产水量的基础上, 考虑土壤厚度、渗透性、地形等因素的影响, 计算涵养水源量。计算方法如下(傅斌等, 2013):

$$WR = (1 - TI) \times \text{Min}(1, K_{sat} / 300) \times \text{Min}(1, T_{rav} \text{Time} / 25) \times \text{Yield} \quad (2)$$

式中, WR 为多年平均涵养量(mm); TI 为地形指数, 无量纲, 根据DEM计算; K_{sat} 为土壤饱和导水率(cm/d); $T_{rav} \text{Time}$ 为径流运动时间(min), 用坡长除以流速系数得到。

$$TI = \log \frac{D \times P}{S} \quad (3)$$

式中, D 为集水区栅格数量, 无量纲; S 为土壤深度(mm); P 为百分比坡度。

涵养水源价值评估采用影子工程法, 即用水库工程的蓄水成本来确定涵养水源的经济价值(张颖, 2015; 付梦娣等, 2016)。公式为 $U = G \times C$ 。其中, U 为年涵养水源价值(元), G 为年涵养水源量(m^3), C 为水库建设单位库容投资(元/ m^3)。

钱江源国家公园水库工程造价可参考2015年浙江衢州市钱江源水库工程项目工程报价([http://](http://www.zgsxzs.com/a/20151224/5489821.html)

www.zgsxzs.com/a/20151224/5489821.html)。

2.2.3 固碳释氧

固碳量采用InVEST模型中碳固定模块计算, 其基本原理如下(Tallis et al, 2011):

$$C = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad (4)$$

式中, C 为碳储量(t); C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{dead} 为死亡有机碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量。植物每生产1 t干物质可以吸收1.63 t CO_2 , 同时释放1.2 t O_2 (白杨等, 2011; 江波等, 2011), 释氧量由固碳量计算获得。根据固碳释氧的物质质量计算其价值, 其中, CO_2 造林成本为1,320元/t (白杨等, 2011); 工业制氧成本为400元/t (白杨等, 2011)。

2.2.4 土壤保持

土壤保持基于InVEST模型中土壤保持模块获得, 其基本原理如下(Tallis et al, 2011):

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (5)$$

式中, R 为降雨侵蚀力, K 为土壤可蚀性, LS 为坡度坡长因子, C 为植被覆盖和管理因子, P 为水土保持措施因子。

土壤保持价值分固土价值和保肥价值。固土价值是将保土量转化为其他类似适当土方工程, 并根据相应工程的造价计算, 以此得到土壤保持价值(张颖, 2015)。公式如下:

$$U_{固} = \frac{G \times C}{\rho} \quad (6)$$

式中, $U_{固}$ 为固土价值(元), G 为土壤固土量(t), C 为挖取和运输单位体积土方所需费用(元/ m^3), ρ 为土壤容重(t/m^3)。其中, 挖取单位面积土方费用为12.6 m^3 (参考《中华人民共和国水利部水利建筑工程预算定额》), 土壤容重 ρ 为1.15 g/cm^3 (李兰英等, 2012)。

保肥价值计算公式如下:

$$U_{保} = \sum \frac{G_i \times C_i}{R_i} \quad (7)$$

式中, $U_{保}$ 为土壤保肥价值(元); G_i 分别为土壤中氮、磷和钾含量; C_i 分别为尿素、过磷酸钙、氯化钾价格; R_i 分别为化肥含氮量、含钾量和含磷量。钱江源国家公园常用化肥(氮肥为尿素、磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化钾)中氮、磷、钾占各类肥料中的比例分别为68.52%、16.94%、14.55%。钱江源国家公园表层土壤全磷、速效磷、速效钾的平均含量分别为

0.1861%、0.0091%和0.0085% (开化国家公园总体规划——生态环境专题研究), 农业部《中国农业信息网》, <http://www.agri.cn/>国产化肥价格中尿素2,000元/t, 过磷酸钙500元/t, 氯化钾2,000元/t。

2.2.5 环境净化

生态系统的净化环境功能包括大气环境净化和水环境净化。其中, 大气环境净化采取市场价值法计算钱江源国家公园各生态系统净化大气污染物所产生的经济价值(付梦娣等, 2016)。计算方法如下(白杨等, 2011):

$$V_e = \sum_{i=1}^n S(U_i \times P_i) \quad (8)$$

式中, V_e 为环境净化总价值(元); S 为各生态系统面积(m^2); U_i 为对第 i 种环境污染物的净化效率; P_i 为第 i 种环境污染物的净化市场价格(元/ m^2)。根据白杨等(2011)的研究, 林木对 SO_2 的年平均吸收能力为120.85 kg/ha; 滞尘的年平均能力阔叶林为10.11 t/ha, 针叶林为33.2 t/ha, 针阔混交林取两者平均值, 为22.7 t/ha。灌木林净化 SO_2 的年平均吸收能力为18.91 kg/ha, 滞尘的年平均能力为1.18 t/ha; 草地净化 SO_2 的年平均吸收能力为21.7 kg/ha, 滞尘的年平均能力为0.12 t/ha。市场治理 SO_2 的费用为0.6元/kg, 处理粉尘的价格为0.56元/kg。

水环境的净化能力通过InVEST模型水质净化模块计算获得(Tallis et al, 2011), 并利用替代成本法, 以污水处理成本的减少作为水质净化服务的经济效益(龚溪等, 2017):

$$V = \sum T_i \times P_i \quad (9)$$

式中, V 为生态系统水质净化的价值(元); T_i 为氮(或磷)保留的总量(kg); P_i 为氮(或磷)的净化单价(元/kg)(江波等, 2011)。

2.2.6 生境质量

生境质量基于InVEST模型中生境质量模块获得, 其基本原理如下(Tallis et al, 2011):

$$Q_{xj} = H_j \left[-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right] \quad (10)$$

式中, Q_{xj} 为土地利用方式 j 中单元格 x 上的生境质量, D_{xj} 为土地利用方式 j 中单元格 x 所受胁迫水平; k 为半饱和和常数, 通常取 D_{xj} 最大值的一半, H_j 为土地利用方式 j 的生境适宜性, z 为归一化常量, 一般取值2.5。

基于Natural Breaks法可将钱江源国家公园生境质量等级空间分布进行划分, 并通过最优生境质量(生境质量得分在90以上)面积来计算生物多样性服务的生态效益, 其中最优化生境质量区域的生态效益为191.28万元/ km^2 (肖强等, 2014)。

2.3 土地利用变化情景

2.3.1 土地利用变化模拟

土地利用变化模拟采用CLUE-S模型, 该模型运行包括5个方面: (1)土地利用需求。(2)土地利用类型转移规则, 包括对不同土地利用类型转移弹性和对土地利用类型之间相互转换的可能性。其中, 土地利用转移弹性一般用0-1的数值表示, 值越接近于0, 表明土地转移的可能性越大。(3)空间政策和转换限制区域。该模块用于设置土地利用类型不会发生改变或限制土地利用类型改变的区域, 如自然保护区等。(4)空间分布适宜性特征。该模块基于土地类型空间格局和多种驱动因素(如气候、高程、土壤性质特征和人口密度和GDP等)之间的相关性, 然后对每个栅格各土地利用类型的适宜性进行评价。模型中, 各土地利用类型空间分布与多种驱动因素之间的关系可以通过Logistic回归方程求得。回归方程一般形式为:

$$\text{Log} \left(\frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} \cdots + \beta_n X_{n,i} \quad (11)$$

式中, P_i 为每个栅格可能出现某一土地利用类型 i 的概率, 取值在0-1之间; X_n 为与土地利用类型 i 相关的驱动因子, β_0 为常量, $\beta_1 - \beta_n$ 分别表示各驱动因子与土地利用类型 i 之间的相关性系数。(5)模型检验。一般采用ROC曲线对每种土地利用类型回归方程的拟合度进行验证。ROC值介于0.5-1, ROC值越接近于1, 说明模拟的土地利用类型分布格局越接近于真实土地利用类型分布状况。在实际模拟过程中, 当ROC值大于0.7时, 说明选取的驱动因子能够很好地解释研究区的土地利用空间格局。

本研究选取高程、坡度、坡向、人口密度、人均GDP、距农村道路的距离、距一般公路的距离、距建设用地的距离和距水域的距离等9个自然因素和社会经济作为驱动力。将上述9个驱动力用Logistic逐步回归计算土地利用空间分布与驱动力之间的关系, 并采用ROC曲线检验, 各土地利用类型的ROC曲线结果分别为0.811、0.753、0.837、0.887、

0.956、0.804、0.904、0.850、0.985、0.933和0.987，均大于0.7，检验结果较好。此外，Kappa指数为0.894，说明模型模拟结果较好(朱康文等, 2015)。

2.3.2 土地利用情景设计

(1)自然发展情景。该情景根据钱江源国家公园2010–2015年的土地利用类型数据，计算其土地利用变化速率，并以此推算出2025年的土地利用需求情况，该情景只考虑钱江源国家公园土地利用类型按照现有变化速率的自然变化。

(2)规划情景。该情景的设定主要参考钱江源国家公园体制试点区总体规划(2016–2025)、浙江省开化县生态文明建设规划(2013–2025)和开化国家东部公园发展战略规划等相关文件，并征求了开化县环境保护局等管理部门的意见。钱江源国家公园坡度在25°以上或高程大于400 m的区域主要是自然原始林地，区内人工建筑或农田主要分布在坡度0–12°之间和高程低于200 m的区域。因此，该情景设定为：各功能区坡度在25°以上或高程大于400 m的灌木林、针阔混交林、草地、人工表面和裸地转化成阔叶林；核心保护区中人工表面恢复成阔叶林；生态保育区中沿着公路两边1,000 m之内，同时坡度在0–12°或海拔低于200 m的土地覆被转化成建设用地；游憩展示区和传统利用区坡度低于25°或海拔低于400 m的土地覆被转化成建设用地。

(3)生态保护情景。该情景在规划情景的基础上设定更为严格的生态保护政策，各功能区坡度在12°以上或海拔高于200 m的灌木林、针阔混交林、草地、人工表面和裸地转化成阔叶林；核心保护区中人工表面恢复成阔叶林；生态保育区中沿着公路两边500 m之内，同时坡度在0–12°或海拔低于200 m才转化成建设用地；游憩展示区和传统利用区均只能在坡度低于12°或高程小于200 m进行建设用地等开发利用。

(4)开发利用情景。该情景假设钱江源国家公园在进行生态保护的同时也注重开发利用，各功能区坡度在25°以上或高程大于400 m的灌木林、针阔混交林、草地、人工表面和裸地全部转化成阔叶林；核心保护区和生态保育区坡度在12°以下或高程小于200 m的土地覆被进行建设用地等开发利用；游憩展示区和传统利用区坡度低于25°或海拔低于400 m的土地覆被可转化成建设用地。

3 结果

3.1 土地利用变化时空分析

钱江源国家公园4个土地利用变化情景和2015年土地利用类型面积变化及分布情况如图2和表1所示。(1)自然发展情景下，阔叶林、建设用地和裸地面积增加，其他土地利用类型减少，其中，阔叶林增加面积最多，为202.8 ha (+1.2%)，增加的阔叶林主要由针叶林、建设用地和水田等转变而来。水田面积减少最多，为153.5 ha (-39.5%)。(2)规划情景和生态保护情景下，阔叶林面积增加，水域面积略微增加，其他土地利用类型减少。其中，阔叶林面积分别增加796.0 (+4.6%)和1,907.9 ha (+11.1%)，规划情景下增加的阔叶林主要是针阔混交林、灌木林、水田和旱地等转变而来，生态保护情景下则由针叶林、灌木林、草丛、水田和旱地转变而来。规划情景下，水田减少面积最多，为246.4 ha (-63.4%)，生态保护情景下，灌木林面积减少最多，减少了832.9 ha (-87.0%)。(3)开发利用情景下，建设用地面积增加，水域面积不变，其他土地利用类型面积减少，其中，建设用地面积增加了206.2 ha (+359.9%)，增加的建设用地主要从阔叶林、针叶林、灌木林、水田和旱地转变而来；水田面积减少最多，减少了82.2 ha (-21.2%)。

3.2 不同土地利用情景下生态系统服务及其价值

3.2.1 2015年各功能分区生态系统服务及其价值

对钱江源国家公园2015年各功能分区生态系统服务及其价值进行评估，结果如表2和图3所示。水资源供给、涵养水源、土壤保持、固碳释氧、SO₂吸收、滞尘清理等生态系统服务集中分布在核心保护区和生态保育区，营养物质N和P输出主要集中在传统利用区。从价值量来看，生态保育区各生态系统服务价值最高，核心保护区次之，分别占2015年生态系统服务总价值的55.45%和32.85%。

3.2.2 2025年不同土地利用情景下生态系统服务及其价值

由于土地利用方式的变化，使得钱江源国家公园2025年不同土地利用情景下生态系统服务呈现显著的变化，结果如表3所示。生态保护情景下，除水资源供给和涵养水源量最少外，其他生态系统服务均最高；开发利用情景则呈现和生态保护情景相

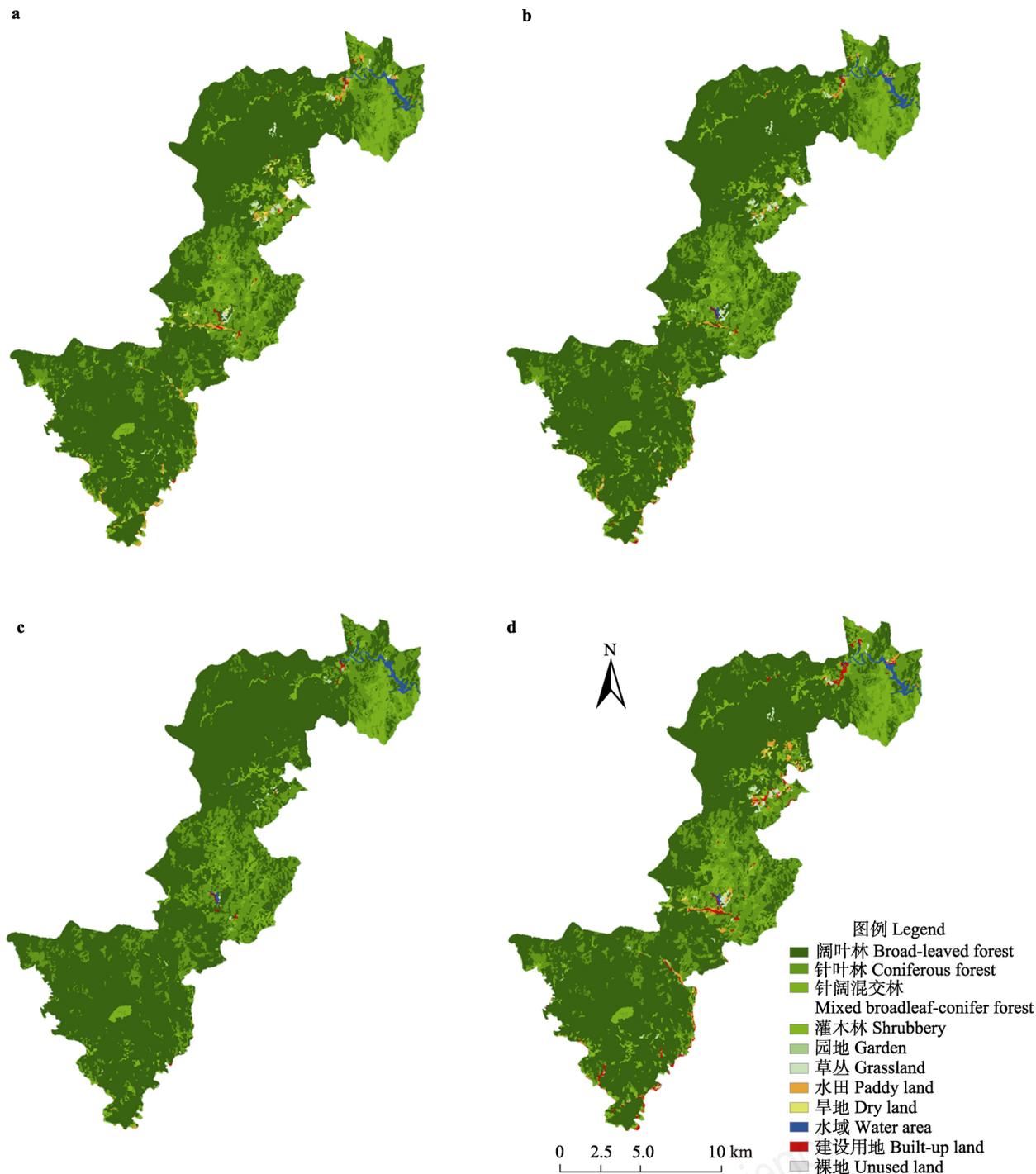


图2 钱江源国家公园体制试点区2025年土地利用类型图。(a)自然发展情景;(b)规划情景;(c)生态保护情景;(d)开发利用情景。
 Fig. 2 Land use types of the Qianjiangyuan National Park pilot in 2025. (a) Business as usual; (b)Strategic planning; (c) Ecological protection; (d) Development.

反的情形; 规划情景下, 涵养水源量最多, 水资源供给优于生态保护情景; 其他生态系统服务则仅次于生态保护情景。

根据不同土地利用情景生态系统服务的物质质量计算其价值, 结果如图4所示。从生态系统服务类

型来看, 固碳释氧的价值最高, 占生态系统服务总价值比例的63%左右。总体来看, 生态保护情景下生态系统服务价值量最高, 为129.17亿元; 其次为规划情景, 为126.92亿元; 开发利用情景价值量最少, 为125.12亿元。

表1 2015-2025年钱江源国家公园土地利用类型面积

Table 1 Land use/land cover of the Qianjiangyuan National Park pilot between 2015 and 2025

土地利用类型 Land use type (ha)	2015	自然发展情景 Business as usual	规划情景 Strategic planning	生态保护情景 Ecological protection	开发利用情景 Development
阔叶林 Broad-leaved forest	17,166.9	17,369.7	17,962.9	19,074.8	17,123.6
针叶林 Coniferous forest	4,670.1	4,655.0	4,634.3	4,383.9	4,652.9
针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest	1,412.2	1,409.2	1,286.7	1,248.8	1,404.1
灌木林 Shrubbery	957.3	953.3	665.8	124.4	937.6
园地 Garden	24.2	23.6	11.1	13.3	18.9
草丛 Grassland	159.9	158.4	154.8	39.7	151.1
水田 Paddy field	388.4	234.9	142.0	13.1	306.2
旱地 Dry land	98.6	96.9	13.8	3.8	79.9
水域 Water area	148.0	120.4	148.5	148.0	148.0
建设用地 Built-up land	57.3	59.3	65.3	36.4	263.5
裸地 Unused land	4.1	6.3	1.8	0.8	1.2
合计 Total	25,087	25,087	25,087	25,087	25,087

表2 2015年各功能分区生态系统服务的物质质量

Table 2 The quality of ecosystem services of different functional areas in 2015

	核心保护区 Core protection area	生态保育区 Ecological conservation area	游憩展示区 Recreation area	传统利用区 Traditional utilization area
供给服务 Provisioning services				
水资源供给 Water yield ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	6,721.613	19,460.106	682.811	4,457.063
调节服务 Regulating services				
涵养水源 Water conservation ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	639.814	840.122	59.338	136.947
土壤保持 Soil conservation ($\times 10^4 \text{ t}$)	546.608	721.516	29.546	96.026
固碳量 Carbon sequestration ($\times 10^4 \text{ t}$)	183.773	258.128	13.635	34.921
释氧量 Oxygen release ($\times 10^4 \text{ t}$)	135.294	190.033	10.038	25.708
环境净化 Environment purification				
SO ₂ 吸收 SO ₂ absorption (t)	996.312	1,504.517	104.472	225.932
滞尘清理 Clean detaining dust ($\times 10^4 \text{ t}$)	11.553	22.016	0.738	1.874
N输出量 Nitrogen output (t)	11.198	31.121	12.083	59.054
P输出量 Phosphorus output (t)	0.466	1.411	0.418	2.262
栖息地服务 Supporting services				
生境质量得分 Habitat quality	0.936	0.888	0.855	0.815
最优生境质量面积 Area of the optimal habitat quality (km^2)	70.633	89.032	3.845	8.933

4 讨论

中共十八大把生态文明建设纳入中国特色社会主义事业五位一体总体布局,从国家层面上重视生态保护,提出建设国家公园体系,该体系旨在重视生态保护的同时,也要保障人民福祉。之前在自然保护区和风景名胜区规划下通常只注重生物多样性和景观美学,往往忽视生态系统服务,而生态系统服务是影响生态系统服务的重要因素之一

(MA, 2005; He et al, 2018)。国家公园试点区未来土地如何进行合理的应用,必须考虑到土地利用变化对生态系统服务的影响,将生态系统服务评估纳入土地利用决策中去,从时间上权衡未来土地利用变化对生态系统服务的影响(傅伯杰等, 2014),这样做的好处是可以明确土地利用变化对生态系统服务所带来的影响,尤其是负面影响。如Nelson等(2009)设计了3种基于利益相关者的土地利用变化情景,利用InVEST模型模拟预测了美国俄勒冈州威拉米

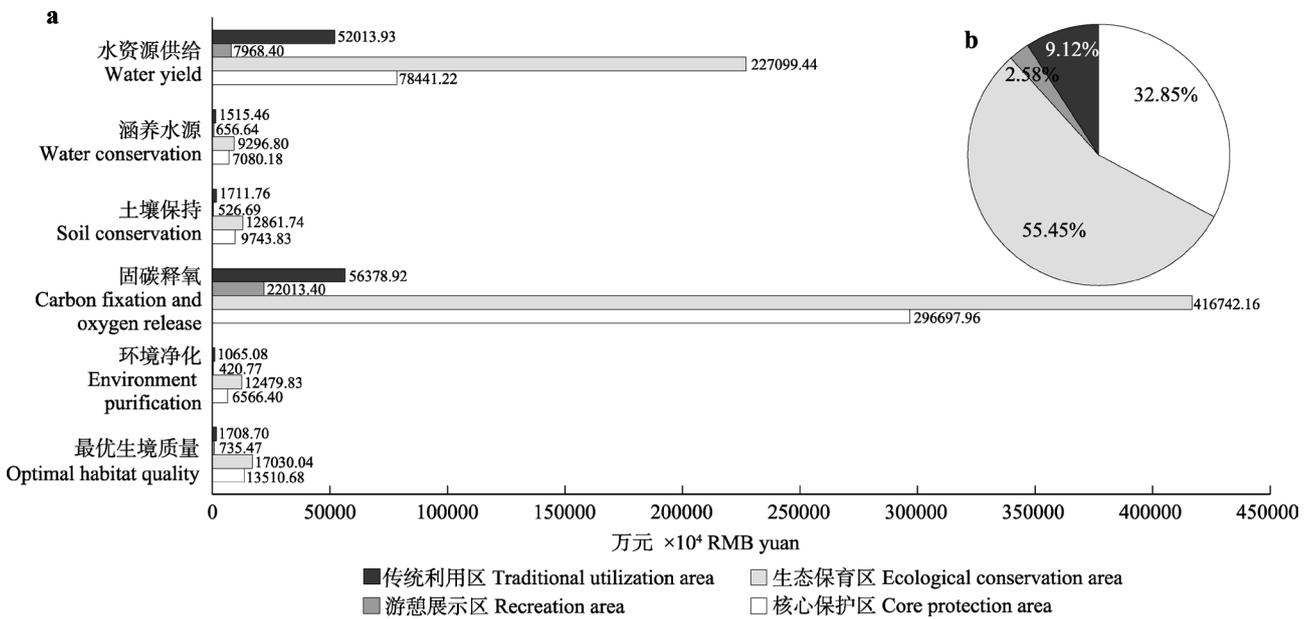


图3 2015年各功能分区生态系统服务价值及其比例。(a)生态系统服务价值;(b)生态系统服务价值比例。
Fig. 3 The value and percentage of ecosystem services of different functional areas in 2015. (a) The value of ecosystem services of different functional areas; (b) The percentage of ecosystem services of different functional areas

表3 不同土地利用情景下生态系统服务的物质质量
Table 3 The quality of ecosystem services under various land use scenarios

	2015	自然发展情景 Business as usual	规划情景 Strategic planning	生态保护情景 Ecological protection	开发利用情景 Development
供给服务 Provisioning services					
水资源供给 Water yield (×10 ⁴ m ³)	31,321.593	31,306.852	31,199.755	30,900.282	31,355.505
调节服务 Regulating services					
涵养水源 Water conservation (×10 ⁴ m ³)	1,676.222	1,682.344	1,687.435	1,665.958	1,674.278
土壤保持 Soil conservation (×10 ⁴ t)	1,393.696	1,394.248	1,394.778	1,395.213	1,394.026
固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release					
固碳量 Carbon sequestration (×10 ⁴ t)	490.457	492.860	499.544	514.359	488.556
释氧量 Oxygen release (×10 ⁴ t)	361.073	362.841	367.762	378.669	359.673
环境净化 Environment purification					
SO ₂ 吸收 SO ₂ absorption (t)	2,831.233	2,853.432	2,902.315	3,005.724	2,822.379
滞尘清理 Clean detaining dust (×10 ⁴ t)	36.181	36.328	36.548	36.689	36.059
N输出量 Nitrogen output (t)	113.456	90.301	59.424	42.602	94.647
P输出量 Phosphorus output (t)	4.557	3.507	2.206	1.463	3.700
栖息地服务 Supporting services					
生境质量得分 Habitat quality	0.938	0.941	0.954	0.968	0.934
最优生境质量面积 Area of the optimal habitat quality (km ²)	172.443	174.480	179.253	190.691	170.635

特河流域生态系统服务供给的变化, 结果表明当土地所有者的决策仅仅基于市场回报的时候, 则决策者会选择生态系统服务供给价值高与生物多样性保护程度较低的土地利用/土地覆被格局, 这与本

研究中的经济发展情景相类似。Goldstein等(2015)根据夏威夷瓦胡岛Kamehameha学校的发展需求, 设计了7个土地利用规划用地情景, 利用InVEST模型评估和权衡了不同情景下碳固定和水质改善等

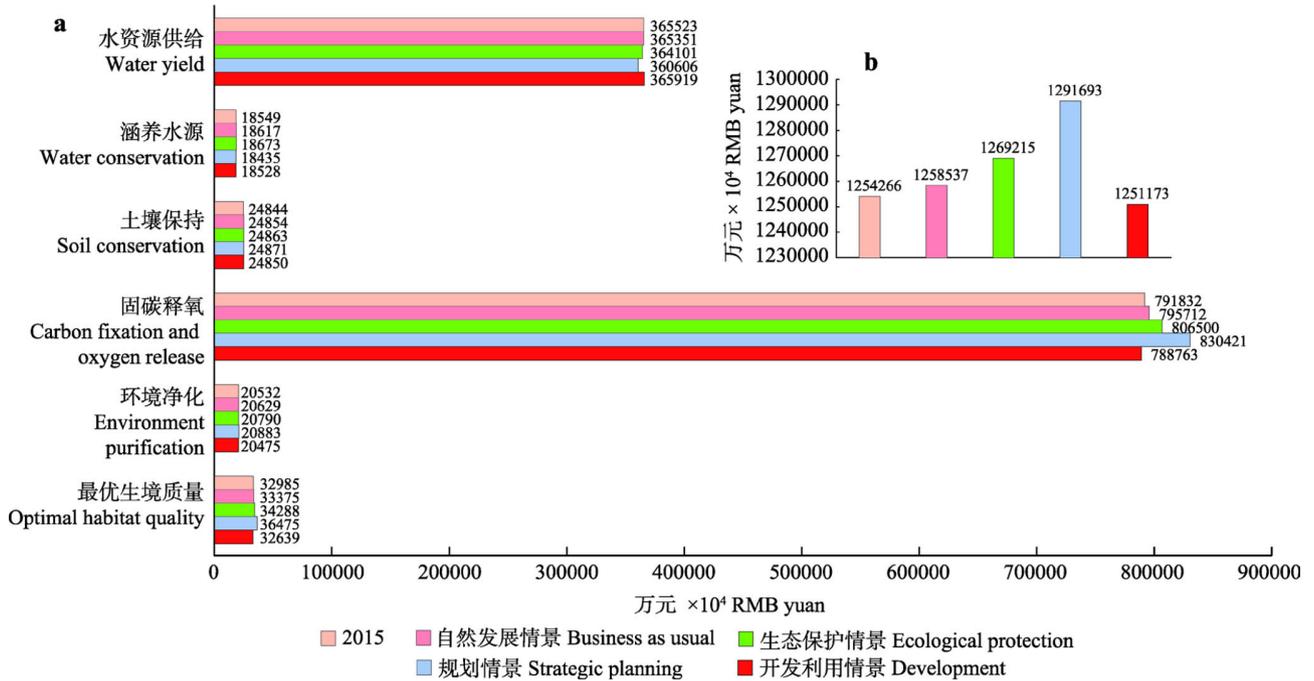


图4 不同土地利用情景下的生态系统服务价值。(a)各生态系统服务价值(万元);(b)生态系统服务总价值(万元)。

Fig. 4 The value of ecosystem services under different land use scenarios. (a) The value of multiple ecosystem services under different land use scenarios ($\times 10^4$ RMB yuan); (b) The total value of ecosystem services under different land use scenarios ($\times 10^4$ RMB yuan)

生态系统服务供给变化和土地利用方式改变所产生的经济回报。我国学者在土地利用情景下生态系统服务的变化方面也作了一些有益的探索,如白杨等(2013)在对白洋淀流域生态系统服务评估时,设计3种土地利用情景,权衡各土地利用情景下生态系统服务的变化,得出保护情景下生态系统服务最好,这与本研究的生态保护情景研究结果相类似。目前,国际上利用情景分析法分析土地利用变化对国家公园生态系统服务的影响研究较少(Lacher et al, 2018; Mukul et al, 2017; Ramachandra et al, 2018),这意味着我国在国家公园体制建设过程中要加强土地利用政策对国家公园生态系统服务影响的研究,将评估结果纳入到土地利用决策中去。

本文采用情景分析法设计了钱江源国家公园2025年4种土地利用情景,对不同土地利用情景下生态系统服务影响的研究发现,生态保护情景下除水资源供给外,其他生态系统服务均最优,规划情景下的生态系统服务除水资源供给外,均仅次于生态保护情景,这是因为阔叶林等生态林地蒸散能力较强,单位面积的生态林地比其他类型更易失水分,这就出现过多增加生态林地反而使得水资源供给

能力下降的现象(李屹峰等, 2013; Gao et al, 2017),而钱江源国家公园作为钱塘江的源头,为下游提供了重要的水资源,因此土地利用决策时必须考虑到这一因素。此外,笔者系统地计算了钱江源国家公园2015年和2025年4种土地利用情景下的生态系统服务价值,发现2015年钱江源国家公园生态系统服务价值为125.43亿元,而当年开化县GDP总量为101.61亿元(2015年开化县国民经济和社会发展的统计公报, <http://khnews.zjol.com.cn/khnews/system/2016/02/17/020191950.shtml>),2025年生态保护情景下的生态系统服务价值最高,达到129.17亿元,规划情景下的服务价值次之,为126.92亿元,虽然生态保护情景下的价值最高,但该情景下土地政策过于严格,不利于当地居民共享国家公园建设的成果,获得最大的福祉。规划情景下的土地利用政策是通过和政府管理部门沟通、参考国家公园相关规划和实地考察,进行了更加科学合理的规划,不仅可以有效提高钱江源国家公园生态系统服务价值,比2015年的服务价值增加了1.49亿元,这对本身生态资源禀赋较好的钱江源国家公园来说是难能可贵的,而且也能获得经济发展所必须的建设用地(建

设用地面积较2015年增加了13.78%)。合理的土地利用规划可以更好地支撑生态保护和经济发展在其他学者的研究中也得到了佐证,如包蕊等(2018)对甲积峪小流域未来土地利用方式进行科学合理规划,优化具有高水土保持价值的乔木林分布和高经济价值的经济林和果园分布,并对规划目标情景下生态系统服务价值进行了评估,得出规划情景下服务价值增加461.48万元,比基准年服务价值增加了9.23%。相反,土地政策决策失误则会导致生态系统服务价值下降,如邵小云等(2018)研究了舟山市普陀区土地利用变化对生态服务价值的影响,研究表明,由于目标年2020年大量的林地和水域被调整为生态系统服务价值较低的建设用地和耕地,从而使得2020年生态系统服务价值较2006和2015年下降。

综上所述,规划情景的土地利用方式最为优化。在该情景下,注重了与管理部门协商,并对钱江源国家公园进行了实地考察。通过协商和考察,对不同功能区提出不同的土地利用政策:坡度在25°以上和海拔400 m以上区域多为自然原始林地,一旦破坏极难恢复(Trisurat et al, 2016),因此,各功能区都注重自然原始林地的保护,增加灌木林、草地和裸地向阔叶林的转化,同时在核心保护区禁止所有开发活动,生态保育区严格控制建设用地,仅在游憩展示区和传统利用区里进行合理的开发利用,更大程度上增加经济发展所需的土地资源,并由此增加当地居民的福祉。

土地利用变化不仅使区域地表结构发生变化,还改变了生态系统结构和过程,进而影响生态系统产品供给和服务能力(Sun et al, 2018)。钱江源国家公园通过生态经济的转型的创新发展,对探索我国东部人口密集和经济发达地区产业结构转型和区域可持续发展具有示范作用。此外,作为浙江省第一大河钱塘江的源头地区,钱江源国家公园的建设对我国江河源头区域生态文明建设具有示范意义。因此,钱江源国家公园建设一定要加强土地利用政策对生态系统服务影响的研究,在充分考虑生态保护的前提下,高效地利用土地资源,增加人民福祉,让人民共享改革的成果,这也是习近平总书记所说的“既要金山银山,也要绿水青山”的要义所在。

本研究尚存在以下不足之处:(1)对生态系统服务评估只考虑了供给功能中水资源供给、调节功能

中涵养水源、土壤保持、固碳释氧、环境净化和栖息地服务中的生境质量,下一步应完善钱江源国家公园生态系统服务评估体系,增加评估指标,如:初级产品供给、气候调节、文化服务中的娱乐和旅游价值等。(2)需要更加细化钱江源国家公园未来土地利用情景,如结合钱江源国家公园总体规划中社区发展规划等。(3)数据方面:遥感数据采用精度更高的数据。此外,InVEST模型运行所用的各因子数据可采用野外实验的方法获取等。

参考文献

- Bai Y, Ouyang ZY, Zheng H, Xu WH, Jiang B, Fang Y (2011) Evaluation of the forest ecosystem services in Haihe River Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 2029–2039. (in Chinese with English abstract) [白杨, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 江波, 方瑜 (2011) 海河流域森林生态系统服务功能评估. *生态学报*, 31, 2029–2039.]
- Bai Y, Zheng H, Zhuang CW, Ouyang ZY, Xu WH (2013) Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 711–717. (in Chinese with English abstract) [白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华 (2013) 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 33, 711–717.]
- Bao R, Liu F, Zhang JP, Duan YL, Zhao S, Yan XY, Liu Y (2018) Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 812–828. (in Chinese with English abstract) [包蕊, 刘峰, 张建平, 段颖琳, 赵帅, 严晓亚, 刘英 (2018) 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化. *生态学报*, 38, 812–828.]
- Butler JRA, Wong GY, Metcalfe DJ (2013) An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 180, 176–191.
- Cao W, Li R, Chi X, Chen N, Chen J, Zhang H, Zhang F (2017) Island urbanization and its ecological consequences: A case study in the Zhoushan Island, East China. *Ecological Indicators*, 76, 1–14.
- Delphin SF, Escobedo J, Elrahman AA, Cropper WP (2016) Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Policy*, 54, 188–199.
- Fu B, Xu P, Wang YK, Peng Y, Ren J (2013) Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 789–797. (in Chinese with English abstract) [傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静 (2013) 都江堰市水源涵养功能空间格局. *生态学报*, 33, 789–797.]
- Fu BJ, Zhang LW (2014) Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in*

- Geography, 33, 441–446. (in Chinese with English abstract) [傅伯杰, 张立伟 (2014) 土地利用变化与生态环境服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 33, 441–446.]
- Fu MD, Li JS, Zhang RA, Gao XQ, Xiao NW (2016) Valuation of the ecosystem services in southern mountain of Zhejiang Province. *Ecological Economy*, 32, 189–193. (in Chinese with English abstract) [付梦娣, 李俊生, 章荣安, 高晓奇, 肖能文 (2016) 浙江省南部山区生态系统服务价值评估. 生态经济, 32, 189–193.]
- Gao J, Li F, Gao H, Zhou C, Zhang X (2017) The impact of land-use change on water-related ecosystem services: A study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 163, 148–155.
- Goldstein J, Caldarone G, Duarte TK, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily GC (2015) Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109, 7565–7570.
- Gong X, Cao MC, Sun XP, Le ZF, Li S, Xu HG (2017) Valuation of ecosystem services in Wuyishan City. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 33, 1094–1101. (in Chinese with English abstract) [龚溪, 曹铭昌, 孙孝平, 乐志芳, 李双, 徐海根 (2017) 武夷山市生态系统服务价值评估. 生态与农村环境学报, 33, 1094–1101.]
- He S, Su Y, Wang L, Gallagher L, Cheng H (2018) Taking an ecosystem services approach for a new national park system in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 136–144.
- Huang HC, Yun YX, Miao ZT, Hao C, Li HY (2013) Multi-scenario and prediction of ecosystem services as affected by urban expansion: A case study in coastal area of Tianjin, North China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 697–704. (in Chinese with English abstract) [黄焕春, 运迎霞, 苗展堂, 郝翠, 李洪远 (2013) 城市扩张影响下生态系统服务的多情景模拟和预测——以天津市滨海地区为例. 应用生态学报, 24, 697–704.]
- Huang J, Zhang XM, Zhang JC (2010) Comprehensive evaluation on soil and water conservation function of main forest types of ecological protection forest in Kaihua County. *Research of Soil and Water Conservation*, 17, 88–90. (in Chinese with English abstract) [黄进, 张晓勉, 张金池 (2010) 开化生态公益林主要森林类型水土保持功能综合评价. 水土保持研究, 17, 88–90.]
- Jiang B, Ouyang ZY, Miao H, Zheng H, Bai Y, Zhuang CW, Fang Y (2011) Ecosystem services valuation of the Haihe River Basin wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 2236–2244. (in Chinese with English abstract) [江波, 欧阳志云, 苗鸿, 郑华, 白杨, 庄长伟, 方瑜 (2011) 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 31, 2236–2244.]
- Jiang W, Chen Z, Lei X, He B, Jia K, Zhang Y (2016) Simulation of urban agglomeration ecosystem spatial distributions under different scenarios: A case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. *Ecological Engineering*, 88, 112–121.
- Lacher IL, Ahmadisharaf E, Fergus C, Akre T, McShea WJ, Benham BL, Kline KS (2018) Scale-dependent impacts of urban and agricultural land use on nutrients, sediment, and runoff. *Science of Total Environment*, 652, 611–622.
- Li C, Zheng H, Li S, Chen X, Li J, Zeng W, Liang Y, Polasky S, Feldman MW, Ruckelshaus M, Ouyang ZY, Daily GC (2015) Impacts of conservation and human development policy across stakeholders and scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112, 7396–7401.
- Li LY, Xing H, Wu YJ, Gong XF, Li L (2012) Assessment of forest ecosystem services value based on MA—Taking Suichang County in Zhejiang Province as the case. *Issues of Forestry Economics*, 32, 317–322. (in Chinese with English abstract) [李兰英, 邢红, 吴英俊, 龚笑飞, 李浪 (2012) 基于MA的森林生态系统服务价值评价——以浙江省遂昌县为例. 林业经济问题, 32, 317–322.]
- Li YF, Luo YC, Liu G, Ouyang ZY, Zheng H (2013) Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun Reservoir watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 726–736. (in Chinese with English abstract) [李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华 (2013) 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 33, 726–736.]
- MA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press/World Resources Institute, Washington, DC.
- Mukul SA, Sohel MSI, Herbohn J, Inostroza L, König H (2017) Integrating ecosystem services supply potential from future land-use scenarios in protected area management: A Bangladesh case study. *Ecosystem Services*, 26, 355–364.
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J (2009) Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 4–11.
- Polasky S, Nelson E, Pennington D (2011) The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota. *Environmental & Resource Economics*, 48, 219–242.
- Qian YF, Yi LT, Dou PM, Zhu GL, Ying BG, Yu SQ (2012) Biomass and carbon fixation with oxygen release benefits in an ecological service forest of Jinyun County, China. *Journal of Zhejiang A & F University*, 29, 257–264. (in Chinese with English abstract) [钱逸凡, 伊力塔, 刁培民, 朱国亮, 应宝根, 余树全 (2012) 浙江缙云公益林生物量及固碳释氧效益. 浙江农业大学学报, 29, 257–264.]
- Ramachandra TV, Bharath S, Gupta N (2018) Modelling landscape dynamics with LST in protected areas of Western Ghats, Karnataka. *Journal of Environment Management*, 206, 1253–1262.
- Shao XY, Zhang ZF, Liu Z, Jing CW, Qi JG, Jiang JG, Cai XM, Liu QK (2018) Effects of land use change and planning regulation on ecosystem service values of islands: A case

- study of Putuo District, Zhoushan Archipelago. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 514–522. (in Chinese with English abstract) [邵小云, 张则飞, 刘中, 荆长伟, 齐家国, 蒋锦刚, 蔡秀敏, 刘乾坤 (2018) 土地利用变化及规划结构对海岛生态系统服务价值的影响——以舟山市普陀区为例. *生态学杂志*, 37, 514–522.]
- Sun X, Lu Z, Li F, Crittenden JC (2018) Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 94, 117–129.
- Swetnam RD, Fisher B, Mbilinyi BP (2011) Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling. *Journal of Environmental Management*, 92, 563–574.
- Tallis H, Ricketts T, Guerry A (2011) *INVEST 2.4.4 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford.
- Trisurat Y, Eawpanich P, Kalliola R (2016) Integrating land use and climate change scenarios and models into assessment of forested watershed services in Southern Thailand. *Environment Research*, 147, 611–620.
- Wang J, Peng J, Zhao M, Liu Y, Chen Y (2017) Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China. *Science of Total Environment*, 574, 57–64.
- Xiao Q, Xiao Y, Ouyang ZY, Xu WH, Xiang S, Li YZ (2014) Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 216–223. (in Chinese with English abstract) [肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志 (2014) 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 34, 216–223.]
- Zhang J, Yuan WG, Ge Y, Jiang B, Zhu JR, Shen AH, Chang J (2010) Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 3839–3848. (in Chinese with English abstract) [张骏, 袁位高, 葛滢, 江波, 朱锦茹, 沈爱华, 常杰 (2010) 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力. *生态学报*, 30, 3839–3848.]
- Zhang Y (2015) *Forest Ecological Benefit Evaluation and Construction of Balance Sheet*. China Economic Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张颖 (2015) 生态效益评估与资产负债表编制. 中国经济出版社, 北京.]
- Zheng H, Li Y, Robinson BE, Liu G, Ma D, Wang F, Lu F, Ouyang Z, Daily GC (2016) Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 527–532.
- Zheng H, Li YF, Ouyang ZY, Luo YC (2013) Progress and perspectives of ecosystem services management. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 702–710. (in Chinese with English abstract) [郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初 (2013) 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 33, 702–710.]
- Zhu KW, Li YC, Zhou MT (2015) Land use scenario simulation of the main city of Chongqing based on the CLUE-S model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24, 789–797. (in Chinese with English abstract) [朱康文, 李月臣, 周梦甜 (2015) 基于CLUE-S模型的重庆市主城区土地利用情景模拟. *长江流域资源与环境*, 24, 789–797.]
- Zhu YB, Shi YJ (2018) Value evaluation and pricing of water resources in major cities in China. *Resources Science*, 40, 1040–1050. (in Chinese with English abstract) [朱永彬, 史雅娟 (2018) 中国主要城市水资源价值评价与定价研究. *资源科学*, 40, 1040–1050.]

(责任编辑: 薛达元 责任编辑: 时意专)