

多目标规划方法在森林公园功能区划中的应用

李奇伟^{1,2}, 张秀卿¹, 格日乐图², 郭欣欣², 杨 峰³, 吴敏军³, 史久西²

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3. 杭州市城市土地发展有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 【目的】基于景观资源评价和多目标规划开展森林公园功能区划优化研究, 为森林公园景观功能区划提供技术支撑。【方法】以浙江省杭州市富阳区大安顶森林公园为研究区, 开展各景观单元生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度评价, 结果通过线性变换转换为重点保护、维持现状、局部调节和建设改造等4项管理对策适宜度, 最终运用多目标规划法(VMP)寻找各景观单元最优管理对策。【结果】①建立了以生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度为核心的森林公园生态景观质量评价指标体系, 应用结果显示, 大安顶森林公园生态恢复力、视觉敏感度总体水平较高区域差异较大, 景观美景度较高但区域差异较小; ②提出了属性指标-管理对策适宜度的线性变换模型, 实现多指标评价结果向公园功能区划的适宜度转换; ③应用多目标规划方法, 就研究区20个景观单元的管理寻找到最优方案, 寻优结果与景观实际情况高度耦合; ④5个多目标规划方法中, 理想点法、目标规划法、模糊规划法可划为一组, 功效函数法和最大最小法为另一组, 2组内部规划结果基本一致, 组间稍有差异, 其中以模糊规划方法平衡性最好。【结论】森林公园生态景观质量评价研究所获的结果数据通过属性指标-管理对策适宜度模型转换后, 应用多目标规划在全局和景观单元水平寻找到管理对策最优解, 结果与实际情况高度耦合; 5个常见多目标规划方法中, 理想点法、目标规划法、模糊规划法表现良好, 模糊规划法最优, 推荐应用。图4表3参28

关键词: 自然保护地; 森林公园; 景观评价; 适宜度; 多目标规划

中图分类号: S731 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)01-0192-10

Application of multi-objective programming method in forest park management regionalization

LI Qiwei^{1,2}, ZHANG Xiuqing¹, Geriletu², GUO Xinxin², YANG Yin³, WU Minjun³, SHI Jiuxi²

(1. Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, China Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 3. Hangzhou City Land Development Co., Ltd., Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study, on the basis of landscape resource evaluation and multi-objective planning, is aimed to carry out the optimization of forest park functional zoning so as to provide technical support for future work. [Method] Taking Da'an Forest Park as an example, an evaluation was conducted of the eco-resilience, visual sensitivity and landscape beauty of each landscape unit. The results were then, through linear transformation, translated into the suitability of four management countermeasures namely, key protection, maintaining the status quo, local regulation and construction and reconstruction. Finally, the multi-objective planning method (VMP) was used to investigate the optimal management countermeasures for each landscape unit. [Result] (1) The evaluation index system of ecological landscape quality of forest parks was established

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-27

基金项目: “尖兵”“领雁”研发公关计划项目(2022C02053); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502704)

作者简介: 李奇伟(Orcid: 0009-0002-0045-6510), 从事风景园林规划设计研究。E-mail: 1075931903@qq.com。通

信作者: 张秀卿(Orcid: 0009-0007-7488-926X), 教授, 从事风景园林规划设计, 旅游规划设计研究。

E-mail: 18686081487@163.com

with eco-resilience, visual sensitivity and landscape beauty as the core suggesting that the overall level of ecological resilience and visual sensitivity of Da'anding Forest Park was high, but regional differences were large. The scenic beauty was high, but the regional differences were small. (2) A linear transformation model of attribute index management countermeasure suitability was proposed to realize the transformation from multi index evaluation results to the suitability of park functional zoning. (3) The multi-objective programming method was used to seek for the optimal solution for the management of 20 landscape units in the study area, with the optimization results highly coupled with the actual landscape situation. (4) Of the five multi-objective planning methods, the ideal point method, the objective planning method and the fuzzy planning method belonged to one group whereas the efficacy function method and the maximum minimum method belonged to the other group, with the fuzzy programming method showing the best balance and thus recommended in practice and the internal planning results of the two groups are basically the same, with slight differences in between. [Conclusion] The results obtained from the research on the evaluation of the ecological landscape quality of forest parks were converted into attribute index-countermeasure suitability, the optimal solution of management countermeasures was achieved at the global and landscape unit levels by using multi-objective planning, and the results were highly coupled with the actual situation. Besides, of five common multi-objective planning methods, ideal point method, objective planning method and fuzzy planning method performed well, with the performance of the fuzzy planning method being the best. [Ch, 4 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: nature reserve; forest park; landscape evaluation; suitability; multi-objective planning

森林公园既是森林旅游的重要载体,也是维系生物多样性的重要载体^[1],极具保护价值。由于生态系统的复杂性,过于强调某项服务可能导致其他功能减弱^[2-3]。因此,权衡和协调生态系统各项供给与服务,是提高生态系统服务水平的有效手段之一^[4-6]。2019年中国将重要的森林公园纳入自然保护地体系,要求原则上按一般控制区管理,限制人为活动,功能区划成为自然保护地建设的首要任务^[7]。

自然保护地的功能区划一般基于资源环境的生态、视觉特征分析确定^[8],可选择景观适宜度、景观敏感度、景观吸收力和景观美景度等指标通过空间叠加分析法等方法合成综合结果,评价各类土地利用的适宜度^[9-14],制定功能区划方案。另一方面,恢复力最初为物理学概念,指系统在不发生状态转移,或结构、功能、负反馈不发生变化的前提下,能够吸收干扰的度量,经过发展与革新,已逐步转变为生态学概念。这些方法实现了局部(地块利用)最优,但在全局最优上考虑不足,同时对个人经验的依赖性较强。多目标规划(VMP)方法是研究多个目标函数在给定区域上的最优解问题,在军事^[15]、科学^[16]、能源^[17]、经济^[18]、管理^[19]和工程建设^[20]领域广泛应用。JEROEN 等^[21]在生态系统服务供应优化方面利用多目标规划,建立生态系统服务供应指标量化系统,简化土地利用和管理的工作;包蕊等^[22]选取小流域为研究对象,采用多目标线性规划方法,设置生态系统供给服务、水土保持服务和其他服务 3 个目标,设计规划变量并建立约束方程,实现生态系统服务的权衡优化。但多目标规划方法还很少应用在自然公园管理领域。

本研究以浙江省杭州市大安顶省级森林公园为研究对象,在开展生态景观特征评价的基础上,制定不同景观属性(生态恢复力、视觉敏感度、景观美景度)对应不同管理对策(重点保护、维持现状、局部调节、建设改造)的适宜性规则,应用多目标规划方法求算每个景观单元采取不同管理对策的适宜性,据此确定森林公园功能区划最优目标方案,其规划过程可为同类研究提供参考。

1 研究区概况

大安顶森林公园位于浙江省杭州市富阳区东北部(图 1), $29^{\circ}98' \sim 30^{\circ}02'N$, $120^{\circ}05' \sim 120^{\circ}13'E$,跨灵桥、里山、渔山 3 个乡镇,总面积为 21.57 km^2 。公园属仙霞岭余脉,山体上部峰岭延绵,山顶地势平缓,中部则相对陡峭,坡度为 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、海拔为 $120.0 \sim 790.2 \text{ m}$ 。公园区域属亚热带季风性湿润气候,年平均气温为 17.8°C ,全年无霜期为 232 d ,年降水量为 1454 mm ,年日照时数为 1765 h 。森林以大面积

的常绿落叶混交林为基础, 主要树种有檫木 *Sassafras tzumu*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、木荷 *Schima superba*、马尾松 *Pinus massoniana*、枫香 *Liquidambar formosana* 和各种栎类 *Quercus*, 同时混有针叶林、针叶阔叶混交林、灌木林、竹林、苗圃和茶园, 植物种类比较丰富, 生长状况和演替阶段各异。公园森林风景资源有地文、水文、生物、天象与人文资源五大类、28个主要单体, 其中优良级旅游资源21个, 普通级旅游资源6个, 目前利用程度较低, 区内基础设施还较为薄弱, 通行道路多是林道, 硬化率低。公园在自然本底、风景资源与建设现状上, 既有特色, 也有共性, 在浙江具有代表性。

2 研究方法

2.1 数据来源

获取2017年富阳区森林资源规划设计(二类)调查数据、1:10 000地形图、安顶山Landsat 8 OLI_TIRS卫星遥感影像; 通过实地调研采集林分信息和现场照片, 通过RTK采集视点、景点坐标。

2.2 指标体系构建

参照前人研究的相关指标^[8-14], 采用层次分析法(AHP)构建以生态景观质量为目标层, 生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度为准则层^[23]的评价指标体系, 设置各指标取值等级(表1)。

2.3 指标合成

指标通过ArcGIS空间分析和林业二调数据等赋值, 采用等权重方案合成上级指标^[23-25], 如生态恢复力(r)=坡度+坡向+地势起伏度+植被丰富度+土壤稳定性; 视觉敏感度(v)=可视概率+相对视距+醒目程度; 景观美景度(b)=森林类型+自然度+森林蓄积量。

2.4 多目标规划

2.4.1 管理对策设置 管理对策按保护或建设由弱到强依次分为重点保护、维持现状、局部调节和建设改造四大类^[26]。①重点保护(pr)。开展生态系统封育保护, 封锁或撤除园地、游步道等生产和旅游设施, 设置标桩、界线、标牌等保护警示设施, 禁止游人进入。②维持现状(kp)。维持现状景观和功能稳定, 以现状景观和设施为基础开展服务, 但不增加建设项目, 控制和压缩农林业生产经营。③局部调节(ad)。适度开展林相调控优化和农林业生产, 利用森林风景资源开发景区景点, 增加步道、座椅等游览、休息设施, 接受一定程度的人为活动。④建设改造(cn)。优化土地利用格局, 允许较大强度的建设, 如农庄、道路、停车场、游客中心、园中园、露营地等, 承担大部分客流。

2.4.2 属性指标-管理对策的适宜度计算 景观单元的属性由生态恢复力(r)、视觉敏感度(v)、景观美景度(b)3个指标体现。不同属性指标数值对管理对策的适宜程度由适宜度来表征。生态恢复力低的单元应重点保护, 高的可开展建设改造; 生态恢复力或视觉敏感度较低时宜维持现状稳定, 较高时可局部调节优化, 基于此可根据生态恢复力指标值 x 估算4项管理对策的适宜度(S_r), 采用线性模型^[27]估算:

$$S_{r_pr} = \max(x_n) - x_i + \min(x_n);$$

$$S_{r_kp} = \max(x_n) - |x_i - \min(x_n) + [\max(x_n) - \min(x_n)]/3|;$$

$$S_{r_ad} = \max(x_n) - |x_i - \min(x_n) + [\max(x_n) - \min(x_n)]/3 \times 2|;$$

$$S_{r_cn} = x_i.$$

其中, S_{r_pr} 、 S_{r_kp} 、 S_{r_ad} 、 S_{r_cn} 分别为生态恢复力或视觉敏感度对应重点保护、维持现状、局部调节、建设改造的适宜度; x_i 为某单元的生态恢复力或视觉敏感度指标值, x_n 为全部单元的生态恢复力或视觉敏感度指标值。



图1 研究区及景点分布图

Figure 1 Study area and distribution of viewing point

表1 各因子描述及分级表

Table 1 Description and grading table of each factor

准则层	指标	指标描述	取值范围	等级	评分
坡度/(°)		平坦或略有起伏的山坡地	0~<15	一级	5
		中度至中度陡峭的山坡地	15~<30	二级	3
		陡峭的山坡	≥30	三级	1
坡向/(°)	北向		0~45, 315~360	一级	5
	东向或西向		45~135, 225~315	二级	3
	南向		135~225	三级	1
生态恢复力	地形变化大		>50	一级	5
	起伏度/m	地形变化一般	20~50	二级	3
		地形起伏变化不明显	<20	三级	1
植被丰富度	乔、灌、草本层植被		乔木林、苗圃、果园	一级	5
	灌、草层植物群落		灌木林、茶园、竹林	二级	3
	植被稀少, 荒地或草地		规划地、他宜地、非林地	三级	1
土壤稳定性/cm	土壤层厚, 稳定性和恢复能力较好		60、80	一级	5
	土壤厚度中等, 稳定性和恢复力一般		40、50	二级	3
	土壤层薄, 侵蚀严重, 复原力较差		0、20、30	三级	1
相对视距/m	近景带		0~100	一级	7
	中景带		100~300	二级	5
	远景带		300~800	三级	3
相对视距/m	鲜见带		>800	四级	1
			>35	一级	5
		累计可见视点数量	15~35	二级	3
视觉敏感度			1~15	三级	1
			0	四级	0
		景点和道路处均可见		一级	7
醒目程度-公众关注度	景点处可见、道路处不可见			二级	5
	景点处不可见、道路处可见			三级	3
	景点和道路处均不可见			四级	1
醒目程度-景观-环境对比度		>160		一级	7
		120~160		二级	5
		80~120		三级	3
森林类型		40~80		四级	1
	针叶阔叶混交林			一级	9
	常绿落叶混交林			二级	8
景观美景度	常绿阔叶林			三级	7
	针叶林			四级	6
	茶园			五级	5
自然度	一般灌木林			六级	4
	竹林			七级	3
	苗圃			八级	2
森林蓄积量	非林地			九级	1
	原始或受人为影响很小	原生林		一级	5
	有明显人为干扰	原生林+次生林		二级	4
自然度	处于次生演替后期	次生林		三级	3
	人为干扰很大, 演替逆行	次生林+人工林		四级	2
	地带性森林类型破坏殆尽	人工林		五级	1
森林蓄积量		133.5~184.5		一级	9
		99.0~133.5		二级	8
		84.0~99.0		三级	7
森林蓄积量	小班森林蓄积量, $m^3 \cdot hm^{-2}$	66.0~84.0		四级	6
		52.5~66.0		五级	5
		39.0~52.5		六级	4
		15.0~39.0		七级	3

景观美景度与上述2个指标相反,其值越高说明景观优,无需建设改造而宜重点保护;其值越低则宜建设改造。保护适宜度 S_{b_pr} 为指标值,建设适宜度 S_{b_cn} 为 S_{b_pr} 的倒序值;局部调节 S_{b_ad} 在极差的1/3处取得最大值,维持现状 S_{b_kp} 在2/3处取得最大值,以上评价指标-对策适宜度转换的模式见图2。

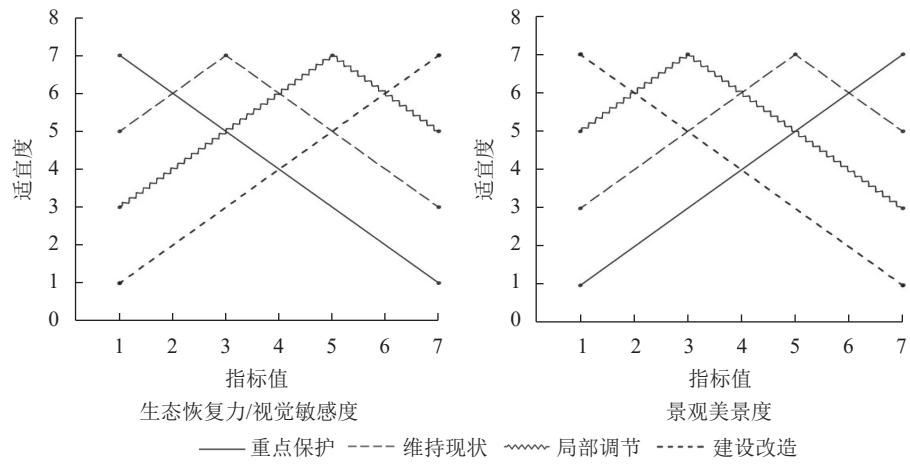


图2 属性指标取值-管理对策适宜度
Figure 2 Attribute index values-management response suitability

2.4.3 多目标规划模型构建与求解 基于属性指标-管理对策适宜度,借助多目标规划方法^[28],在实现3项指标适宜度全局最大的目标下,找出各景观单元的管理对策,模型如下:

$$\max : f_1(x) = S_r x;$$

$$f_2(x) = S_v x;$$

$$f_3(x) = S_b x.$$

$$\text{s.t. } \mathbf{a}x \leq \mathbf{b};$$

$$\mathbf{a}_{eq}x = \mathbf{b}_{eq};$$

$$0 \leq x \leq 1.$$

其中, \max 表示目标函数以全局最大为目标, $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 为适宜度目标函数; S_r 、 S_v 、 S_b 分别为生态恢复力、视觉敏感度、景观美景度指标值对应的适宜度, 具体再分 pr、kp、ad、cn 等4项对策的适宜度; x 表示各单元各管理决策的权重向量(取值0~1); s.t. 为约束条件, $\mathbf{a}x \leq \mathbf{b}$ 进行不同对策措施所涉单元数量约束, 其中 \mathbf{a} 为0~1矩阵, \mathbf{b} 为4个元素的列向量, 代表4项管理对策的单元数量; $\mathbf{a}_{eq}x = \mathbf{b}_{eq}$ 约束每个单元的管理对策, 其中 \mathbf{a}_{eq} 为0~1矩阵, \mathbf{b}_{eq} 为数值为1的列向量, 表示一个单元须且仅对应一项对策; $0 \leq x \leq 1$ 约束 x 值的上、下限。

基于上述模型, 分别采用功效函数法、理想点法、最大最小法、目标规划法、模糊规划法^[27]寻优。功效函数法以 $\max f(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)$ 作为目标函数, 用 Matlab intlinprog 和 linprog 函数分别进行0~1整数和小数求解; 理想点法、目标规划法以 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 各自的最大值(最优解的函数值)为理想点或目标值构造目标函数, 分别应用 fmincon、fgoalattain 工具求解; 最大最小法在 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 3个最大值内取最小值构造目标函数, 应用 fminimax 工具求解; 模糊规划法同时以 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 各自的最大值和最小值作为寻优范围约束构造目标函数, 应用 intlinprog 和 linprog 分别求解。

3 结果与分析

3.1 景观质量综合评价

参照评价指标分级标准,通过单指标赋值运算、重采样,得到景观生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度各评价分级图(图3)。研究区内生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度总体水平较高。其中生态恢复力各单元差异较大,西部与东部明显高于中部;高视觉敏感度区主要分布在道路沿线;西南部分视觉敏感度低。景观美景度高值区域仅含13、17号2个单元,该区坡度平缓,土层深厚,分布有较大面

积的常绿落叶混交林和小面积针阔叶混交林, 植被丰富度很高, 森林蓄积量大。景观美景度较低, 区域景观种类较少, 植被类型单一。生态恢复力、视觉敏感度、景观美景度3个指标按景观单元合计的数据详见表2。

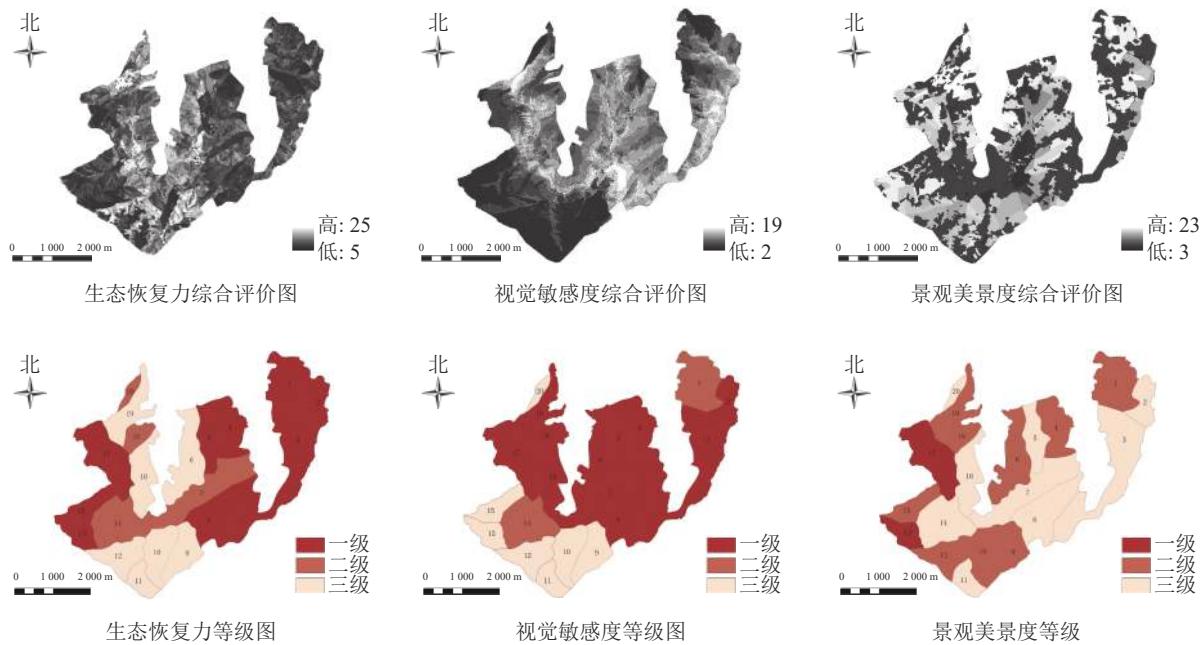


图3 景观质量综合评价分级图

Figure 3 Landscape quality comprehensive evaluation grade maps

表2 景观质量分单元评价结果

Table 2 Evaluation results of landscape quality of each unit

单元编号	面积/m ²	生态恢复力	视觉敏感度	景观美景度	总分	单元编号	面积/m ²	生态恢复力	视觉敏感度	景观美景度	总分
1	1 441 600	1.365 7	4.040 3	5.538 9	10.945 0	11	477 067	3.636 4	1.084 8	4.430 0	9.151 2
2	628 515	1.132 8	6.541 1	4.648 1	12.322 0	12	913 655	3.842 3	1.418 7	4.997 1	10.258 1
3	2 732 600	1.246 8	6.859 2	4.638 6	12.744 6	13	549 659	1.338 1	1.700 7	6.892 7	9.931 5
4	1 030 430	1.136 0	5.916 4	5.688 4	12.740 9	14	1 427 820	2.700 4	3.796 2	4.640 2	11.136 8
5	789 936	2.183 2	6.948 7	4.529 8	13.661 7	15	644 209	1.097 2	1.857 0	5.115 4	8.069 6
6	1 431 930	3.411 5	6.303 2	5.034 5	14.749 2	16	1 112 380	3.877 8	6.426 1	4.879 9	15.183 7
7	1 787 740	2.759 9	6.866 4	4.034 3	13.660 6	17	1 598 890	1.642 6	5.265 2	6.042 9	12.950 7
8	1 603 010	1.859 6	7.340 5	4.591 9	13.792 0	18	479 552	2.689 2	5.577 2	5.566 0	13.832 3
9	890 116	4.490 5	1.586 0	5.843 6	11.920 0	19	889 250	3.652 3	6.084 9	5.837 1	15.574 2
10	966 721	3.452 0	2.744 4	5.204 8	11.401 2	20	179 499	3.348 0	2.142 7	3.942 6	9.433 3

3.2 适宜度计算结果

根据属性指标-管理对策适宜度计量模型, 生态恢复力对建设改造的适宜度为1.097 2~4.490 5; 重点保护适宜度为4.490 5~1.097 2; 局部调节取最大值4.479 1, 最小值2.228 3 ($x=1.097 2$); 维持现状适宜度取最大值4.445 4, 最小值2.228 3 ($x=4.490 5$)。视觉敏感度对建设改造的适宜度为1.084 8~7.340 5; 重点保护适宜度为7.340 5~1.084 8; 局部调节适宜度为3.170 0~7.330 6; 维持现状为3.170 0~6.914 8。景观美景度对重点保护的适宜度为3.942 ~6.892 7; 建设改造为6.892 7~3.942 6; 局部调节为3.942 6~6.892 7; 维持现状为4.926 0~6.827 0。由此可看出, 生态恢复力、视觉敏感度适宜度的取值较为分散, 景观美景度适宜度的均值较高, 值域较小。

3.3 多目标规划结果分析

3.3.1 功能区划结果 根据大安顶森林公园“保护优先, 积极利用”的建设原则和现状基础, 设定重点保护、维持现状、局部调节和建设改造的单元数量的上限分别为4、5、6、7。在此约束条件下, 解得

5种寻优方法的景观单元管理决策权重向量 x 及 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 的最大值 (84.666, 130.793, 127.299)、最小值 (46.787, 61.688, 103.976) 和伸缩因子 (37.879, 69.105, 23.323)。

以 5 个规划 x 解集的平均值 (\bar{x}) 为例, 大部分单元不但取到了恢复力、敏感度、美景度、总适宜度的最大值 (1、6、7、8、10、13、14、15、17、18、19、20 号单元) 或次大值 (5、9、11、12、16 号单元), 同时兼顾了 3 项指标值, 特别是其低值的影响。低值的存在促使管理对策向保护方向靠近。另外 2、3、4 号单元未取到最大值, 但其恢复力偏低, 划为保护其实更为合理 (表 3), 可见规划结果与景观实际情况十分符合。

表 3 景观单元管理决策总体情况

Table 3 Landscape unit management decisions in general

单元 编号	5个规划方法平均					总适宜度			总适宜度排序			生态恢 复力	视觉敏 感度	景观美 景度	
	建设 改造	局部 调节	维持 现状	重点 保护	建设 改造	局部 调节	维持 现状	重点 保护	建设 改造	局部 调节	维持 现状				
1	0	0	1	0	10.7	14.9	16.6	14.1	4	2	1	3	1.37	4.04	5.54
2	0	0.400	0	0.602	13.9	14.9	13.0	11.0	2	1	3	4	1.13	6.54	4.65
3	0.384	0.070	0.421	0.121	14.3	14.7	12.8	10.5	2	1	3	4	1.25	6.86	4.64
4	0	0	0.391	0.609	12.2	15.1	14.7	12.6	4	1	2	3	1.14	5.92	5.69
5	0.679	0.061	0.260	0	15.4	15.5	13.5	9.4	2	1	3	4	2.18	6.95	4.53
6	0	1.000	0	0	15.5	17.5	13.5	9.3	2	1	3	4	3.41	6.30	5.03
7	0.832	0.168	0	0	16.4	15.6	12.6	8.4	1	2	3	4	2.76	6.87	4.03
8	1.000	0	0	0	15.4	14.8	12.9	9.4	1	2	3	4	1.86	7.34	4.59
9	0.360	0	0.249	0.391	11.1	13.0	14.8	13.8	4	3	1	2	4.49	1.59	5.84
10	0	0.020	0.980	0	11.8	15.8	16.4	13.0	4	2	1	3	3.45	2.74	5.20
11	0	0.079	0	0.921	11.1	13.8	13.8	13.7	4	1	2	3	3.64	1.08	4.43
12	0	0.328	0.188	0.484	11.1	14.3	14.4	13.7	4	2	1	3	3.84	1.42	5.00
13	0	0	0	1	7.0	11.2	15.4	17.9	4	3	2	1	1.34	1.70	6.89
14	0	0.137	0.863	0	12.7	16.3	16.4	12.2	3	2	1	4	2.70	3.80	4.64
15	0	0	0	1	8.7	12.9	15.5	16.2	4	3	2	1	1.10	1.86	5.12
16	0.612	0.388	0	0	16.3	17.0	12.8	8.6	2	1	3	4	3.88	6.43	4.88
17	0	0.082	0.918	0	11.7	15.9	15.9	13.1	4	2	1	3	1.64	5.27	6.04
18	0	0.795	0.205	0	13.5	17.1	15.5	11.3	3	1	2	4	2.69	5.58	5.57
19	0	0.863	0.137	0	14.7	16.7	14.3	10.1	2	1	3	4	3.65	6.08	5.84
20	0.004	0.608	0.388	0	12.4	14.6	14.6	12.5	4	1	2	3	3.35	2.14	3.94
合计	3.871	5.000	6.000	5.129	256.0	301.0	289.0	241.0	3.0	1.7	2.1	3.3	2.54	4.52	5.10

3.3.2 不同方法规划结果的比较 根据解集 x 的相似性, 5 种方法大致可分为 2 组, 理想点法、目标规划法、模糊规划法为一组; 功效函数法和最大最小法为另一组。2 组内部规划结果相似度高, 相似对策单元各为 16 个, 相异单元 4 个, 且相异对策单元在保护强度次序上仅出现于相邻位置。组间规划相异结果稍多, 部分出现于相间位置。

总体上, 第 1 组考虑了每个指标的作用, 对生态恢复力较为敏感, 第 2 组以总和为判据, 对视觉敏感度较为敏感。相对而言, 第 1 组的结果更为合理, 其中尤以模糊规划方法平衡性最好 (图 4A), 对生态恢复力较为敏感, 对视觉敏感度较不敏感, 如 2、3、4 号单元因生态恢复力弱, 尽管视觉敏感度高, 仍建议保护; 而功效函数法相反, 对生态恢复力较不敏感, 对敏感度较为敏感, 对 2、3、4 号单元的建设力度较大, 对 9、10、11、12 号单元则以重点保护为主。

几个规划方法获得的单元管理决策量值其实是一种权重, 表示同一单元可有不同的决策选择, 且不同对策的比重不同, 如以平均 x 为例, 3 号单元以维持现状为重点, 若只能实施其中一项对策时, 可按最高值 (0.619) 来选取维持现状, 或可按 0.619:0.381 的面积比进行维持现状和重点保护管理。

3.3.3 整数与非整数规划 以上非整数规划结果以权重的方式提供了详尽的决策信息, 但选择的确定性不够。为此本研究以功效函数法和模糊规划法为例作了 0~1 规划探索, 结果显示功效函数和模糊规划 2 个 0~1 规划结果在大部分景观单元上的寻优结论基本一致, 但在 2、3、4 和 9、10、11、12 号单元上稍有差异 (仅出现相邻对策差别)。模糊规划法的结果差异稍大, 因需要全局平衡, 个别单元 (如 11、12 号单元) 选择了权重较小的对策。0~1 规划虽然可以提供确定性方案, 但也丢失了可能有用的决策信

息, 因此0~1和非整数2类规划各有特点和利弊, 实践中可将两者结合使用。

3.4 功能区划应用

应用多目标规划结果(5种规划结果平均情况见图4B), 结合森林公园的规划规范^[27], 进行景观单元功能区划(图4C)。建设改造区以5、7、8、16号单元为主体, 具有很高的生态恢复力、视觉敏感度和很低的美景度, 适于较高强度的开发建设, 对应森林公园的一般游憩区+服务管理区。一般景观区沿园区内主要交通线路进行分布, 是旅游项目开发建设的重点区域。服务管理区占地面积为0.24 km², 邻接村落设置, 可充分利用村庄基础设施, 建设游客中心。局部调节有6、18、19、20号单元, 具有较高的生态恢复力、视觉敏感度和较低的美景度, 适于低强度开发利用。对应一般游憩区+核心景观区, 提供较为开放的游赏服务。核心景观区均分布在主要游线附近, 提供限制性游览服务, 不建设额外的游憩、服务设施。维持现状包含1、3、10、14、17号单元, 多位于核心景观地带, 生态恢复力、视觉敏感度较低或美景度较高, 不宜建设利用, 对应核心景观区, 提供限制性游览服务。重点保护包含2、4、9、11、12、13、15号单元, 多位于坡度较大或海拔较高, 抗干扰能力弱的区域, 美景度高或视觉敏感度低, 适宜重点保护, 对应生态保育区。

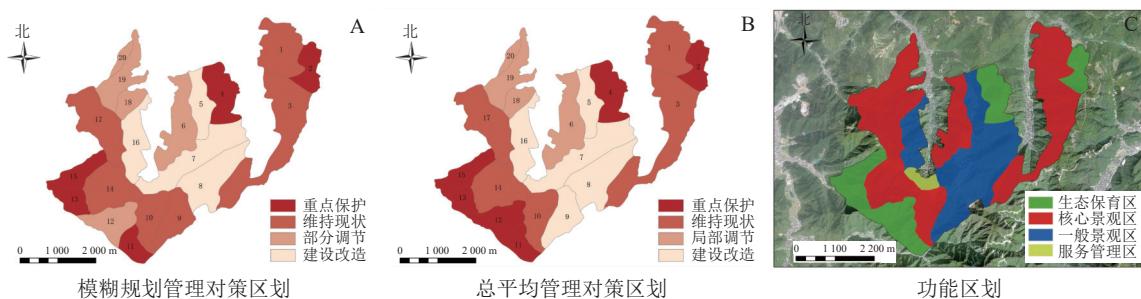


图4 管理对策及功能区划
Figure 4 Management objective hierarchy chart and functional area map

4 讨论

本研究评价指标的选取参考了王晓俊^[8]、裘亦书等^[9]、罗明永^[10]的方法, 但将文献中的视觉吸收力改为了生态恢复力, 在指标体系中增加了生态因子内容。生态恢复力与视觉吸收力所含的下级指标基本相同, 但内涵不同, 生态恢复力是从生态系统的角度而非游人视觉的角度描述其对外界干扰的抵抗能力, 从而使指标体系更为全面, 适应土地管理适宜性问题研究。景观质量与生态服务评价的指标众多, 本研究所选指标只代表了一部分。无论评价指标如何选择, 均可应用后续数量化规划方法, 只需调整目标函数即可。

在多目标规划中还设置了管理对策的单元数量分配约束, 如单元数量最大值约束为4、5、6、7时, 结果与现状情况最为符合。将研究区域划分为景观单元而非直接基于小班进行研究, 一是考虑到景观管理与森林经营的对象不同, 二是为了减少约束变量的数目。此外, 在单个策略博弈中, 模糊规划法的结果最好, 可能与其同时使用各目标函数的最大值和最小值作为寻优范围有关。非整数规划结果以权重的方式提供了详尽的决策信息, 但建议的确定性不够; 整数规划虽然可以提供确定性方案, 但丢失了可能有用的决策信息, 在实践中建议将两者结合使用。

迄今, 关于森林景观资源质量评价的研究大多止于获得评价结果。本研究尝试将评价研究所获的结果数据进一步应用于景观管理量化规划, 取得了理想结果, 其关键技术在于属性指标-管理对策适宜度的转换。本文设计了线性模型进行变换, 形式简单, 效果良好, 后续将会有对属性指标-管理对策适宜度的关系展开研究。

5 结论

本研究建立了由生态恢复力、视觉敏感度和景观美景度为核心的森林公园生态景观质量评价指标体系, 并以大安顶森林公园为研究对象进行了实证, 结果显示: 生态恢复力、视觉敏感度总体水平较高,

各单元间差异较大；景观美景度总体水平较高，各单元间差异不大，高价值景观资源较为缺乏。通过分析景观属性与管理利用适宜性的内在联系，提出了属性指标-管理对策适宜度的线性变换模型，实现多指标评价结果向公园功能区划的适宜度转换，2组内部规划方法结果基本一致，组间规划相异结果稍多；第1组强调每个指标的作用，对生态恢复力较为敏感，第2组以适宜度总和为判据，对视觉敏感度较为敏感。应用多目标规划方法就研究区20个景观单元的管理寻找到最优方案，对5、7、8、16号单元进行建设改造，对6、18、19、20号单元进行局部调节，对1、3、10、14、17号单元维持现状，对2、4、9、11、12、13、15号单元采取重点保护。实现全域和单元、指标和对策中各层级取最大适宜值，规划结果与景观实际应用情况十分符合。

6 参考文献

- [1] 王凯. 自然保护地治理研究进展: 网络治理视角[J]. 林业资源管理, 2020(5): 30–35.
WANG Kai. Research on nature protected area governance from the perspective of network governance [J]. *Forest Resources Management*, 2020(5): 30–35.
- [2] CHISHOLM R A. Trade-offs between ecosystem services: water and carbon in a biodiversity hotspot [J]. *Ecological Economics*, 2010, **69**(10): 1973–1987.
- [3] BENNETT E M, BALVAMERA P. The future of production systems in a globalized world [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**(4): 191–198.
- [4] WU Jianguo. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes [J]. *Landscape Ecology*, 2013, **28**(6): 999–1023.
- [5] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(11): 3102–3111.
CAO Qiwen, WEI Xiaomei, WU Jiansheng. A review on the tradeoffs and synergies among ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(11): 3102–3111.
- [6] 杨光道. 自然保护地整合优化背景下安徽省森林公园发展对策研究[J]. 安徽农业大学学报(社会科学版), 2021, **30**(4): 50–55.
YANG Guangdao. On the development strategies of forest parks in Anhui under the background of the integration and optimization of natural reserves [J]. *Journal of Anhui Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2021, **30**(4): 50–55.
- [7] 谢治凤, 吴必虎, 张玉钧, 等. 中国自然保护地旅游产品类型及其特征[J]. *地域研究与开发*, 2021, **40**(3): 69–74.
XIE Yefeng, WU Bihu, ZHANG Yujun, et al. Types, typology and features of China's protected area tourism products [J]. *Areal Research and Development*, 2021, **40**(3): 69–74.
- [8] 王晓俊. 风景资源管理和视觉影响评估方法初探[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1992, **16**(3): 70–76.
WANG Xiaojun. A preliminary approach to landscape resources management and visual impact assessment in China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 1992, **16**(3): 70–76.
- [9] 裴亦书, 高峻. 基于GIS技术的景观视觉吸收力评价研究——以九寨沟自然保护区为例[J]. 中国园林, 2017, **33**(9): 40–45.
QIU Yishu, GAO Jun. Study of GIS-based landscape visual absorption capability evaluation: a case of Jiuzhaigou nature reserve in China [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2017, **33**(9): 40–45.
- [10] 罗明永. 永安市天宝岩自然保护区森林景观视觉吸收力的评价研究[J]. 林业勘察设计, 1999, **24**(1): 91–94.
LUO Yongming. Evaluation of visual absorption of forest landscape in Tianbaoyan nature reserve of Yong'an City [J]. *Forestry Prospect and Design*, 1999, **24**(1): 91–94.
- [11] 俞孔坚. 自然风景质量评价研究——BIB-LCJ审美评判测量法[J]. *北京林业大学学报*, 1988, **10**(2): 1–11.
YU Kongjian. Landscape Preference: BIB-LCJ procedure and comparison of landscape preference among different groups [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1988, **10**(2): 1–11.
- [12] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 敏感地段的景观安全格局设计及地理信息系统应用——以北京香山滑雪场为例[J]. 中国园林, 2001, **17**(1): 11–16.
YU Konjian, LI Dihua, DUAN Tiewu. Landscape security approach in planning of very sensitive site and GIS application [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2001, **17**(1): 11–16.
- [13] 刘惠明, 杨燕琼, 罗富和. 基于3S技术的景观敏感度测定研究[J]. *华南农业大学学报*, 2003, **24**(3): 78–81.
LIU Huiming, YANG Yanqiong, LUO Fuhe. Study on landscape sensitivity determination with 3S technology [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2003, **24**(3): 78–81.

- [14] 艾婧文, 刘健, 余坤勇, 等. 群落特征和林分空间结构对森林公园景观美学质量贡献率及影响因子[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(6): 1087–1094.
AI Jingwen, LIU Jian, YU Kunyong, et al. Research on contribution rate of plant community characteristics and stand spatial structure to landscape aesthetics quality of forest parks and its influencing factors [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, **34**(6): 1087–1094.
- [15] 魏铁涛, 屈香菊. 多机协同与多目标分配任务规划方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, **35**(8): 917–920, 924.
WEI Tietao, QU Xiangju. Route planning method for multiple vehicles coordinated target assignment [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(8): 917–920, 924.
- [16] 刘刚, 裴红蕾. 复合形引导蜂群寻优的无人机航迹多目标规划[J]. *机械设计与制造*, 2020(4): 253–257.
LIU Gang, PEI Honglei. Unmanned air vehicle route multi-objective planning based on bee colony algorithm guided by complex form [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(4): 253–257.
- [17] 胡枭, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, **43**(19): 22–31, 139.
HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, **43**(19): 22–31, 139.
- [18] 刘满凤, 刘玉凤. 基于多目标规划的鄱阳湖生态经济区资源环境与社会经济协调发展研究[J]. *生态经济*, 2017, **33**(5): 100–105, 159.
LIU Manfeng, LIU Yufeng. Study on resources, environment and social economy coordinated development in Poyang Lake ecological economic zone based on multi-objective programming [J]. *Ecological Economy*, 2017, **33**(5): 100–105, 159.
- [19] 刘帅, 袁梦, 卿东升, 等. 森林经营管理多目标规划模型研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2018, **38**(4): 213–220.
LIU Shuai, YUAN Meng, QING Dongsheng, et al. Multi-objective planning model of forest management [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2018, **38**(4): 213–220.
- [20] 吴健宏, 翁文国. 应急避难场所的选址决策支持系统[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, **51**(5): 632–636.
WU Jianhong, WENG Wenguo. Decision support system for urban shelter locations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, **51**(5): 632–636.
- [21] JEROEN C J G, SELESHI G Y, WALTER A H R. Exploring ecosystem services trade-offs in agricultural landscapes with a multi-objective programming approach [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, **172**: 29–36.
- [22] 包蕊, 刘峰, 张建平. 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[J]. *生态学报*, 2018, **38**(3): 812–828.
BAO Rui, LIU Feng, ZHANG Jianping, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 812–828.
- [23] 郭欣欣. 大安顶森林公园景观资源视觉质量评价与提升策略研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
GUO Xinxin. *Study on Visual Quality Evaluation of Landscape Resources and Improvement Strategy in Da'anping Forest Park* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.
- [24] 石佳鹭. 基于3D场景视线通视分析的视觉敏感度计量技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
SHI Jialu. *Study on Landscape Sensitivity Measurement Technology Based on Visual Analysis of 3D Scene* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.
- [25] 贾娜, 史久西, 秦一心, 等. 森林色彩景观格局指数与色彩属性指标对观赏效应的影响[J]. *林业科学*, 2021, **57**(2): 12–21.
JIA Na, SHI Jiuxi, QIN Yixin, et al. Influence of forest color landscape pattern indices and color attribute indicators on ornamental effect [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(2): 12–21.
- [26] 国家林业和草原局林草调查规划设计院. 森林资源连续清查技术规程: GB/T 38590—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Forestry and Grassland Survey and Planning Institute of the National Forestry and Grassland Administration. Technical Regulations for Continuous Forest Inventory: GB/T 38590–2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [27] 江道琪, 何建坤, 陈松华. 实用线性规划方法及其支持系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 291–299.
JIANG Daoqi, HE Jiankun, CHEN Songhua. *Practical Linear Programming Method and its Supporting System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 291–299.
- [28] 国家林业和草原局. 国家级森林公园总体规划规范: LY/T 2005—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Forestry and Grassland Administration. *Technical Regulations for the Forest Park Master Planning: LY/T 2005–2012* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.