

福建金丝湾森林公园功能区划与生态脆弱性耦合研究

曾琪^{1,2,3}, 刘健^{1,2,3,4}, 余坤勇^{1,2,3}, 张今朝^{1,2,3}, 郑文英^{1,2,3}, 陈樟昊^{1,2,3}

(1. 福建农林大学 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 3. 福建农林大学 “3S” 技术应用研究所, 福建 福州 350002; 4. 三明学院, 福州 三明 365000)

摘要: 揭示不同功能区的生态脆弱程度, 对土地利用合理规划与功能的有效利用具有重要的借鉴意义。以福建省三明市金丝湾森林公园为对象, 选取坡度、植被覆盖度和人为可能性干扰因子等建立生态脆弱性评价指标体系, 采用综合评价法分析研究区生态脆弱性分布特征, 结合耦合度模型确定功能利用与生态脆弱性的关系。结果表明: 研究区主要划分为水源涵养区、水土保持区、水源涵养区和水土保持重叠区与景观游憩区等 4 个功能区, 各区面积分别为 631.01 hm²(37.10%), 844.91 hm²(49.68%), 219.90 hm²(12.93%)和 4.91 hm²(0.29%); 研究区生态脆弱性主要以 II 级(0.2 < I_{EV} ≤ 0.4)和 III 级(0.4 < I_{EV} ≤ 0.6)为主, 整体呈中部偏低, 四周偏高的分布特征; 不同功能区脆弱性有明显差别, 景观游憩功能区主要属于 IV 级生态脆弱区, 水土保持、水源涵养与水土保持重叠功能区、水源涵养功能区以 III 级生态脆弱区为主导; 研究区的土地利用的各功能区与对应等级生态脆弱区基本属于高级耦合, 两者关系密切。图 4 表 5 参 21

关键词: 生态学; 功能区划; 生态脆弱性; 功能利用与生态脆弱性耦合; 森林公园

中图分类号: S718.45; X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)05-0833-08

Coupling research on functional regionalization and ecological vulnerability in the Jinsiwan Forest Park

ZENG Qi^{1,2,3}, LIU Jian^{1,2,3,4}, YU Kunyong^{1,2,3}, ZHANG Jinzhao^{1,2,3}, ZHENG Wenying^{1,2,3}, CHEN Zhanghao^{1,2,3}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring & Sustainable Management and Utilization, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Institute of Geomatics Application, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fuzhou, China; 4. Sanming University, Sanming 365000, Fujian, China)

Abstract: For reasonable land-use planning and effective utilization of systems to reveal ecological vulnerability of different functional zones, functional requirements of the Jinsiwan Forest Park in Sanming City, Fujian Province, the study area, were analyzed and categorized. Spatial distribution of environmental vulnerability was analyzed by choosing slope, vegetation coverage, and the potential human disturbance factor to establish an evaluation system of ecological vulnerability for a comprehensive evaluation. Moreover, the relationship between functional utilization and ecological vulnerability was analyzed by applying a coupling degree model. Results showed that the study area was divided into four functional ecological zones including: water conservation (631.01 hm² or 37.1%), soil and water conservation (844.91 hm² or 49.7%), an overlapping area of water conservation with soil and water conservation (219.90 hm² or 12.9%), and landscape and recreation (4.91 hm² or

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2017-01-03

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2015N5010); 国家自然科学基金资助项目(41401385); 福建省教育厅科技计划项目(JA14126)

作者简介: 曾琪, 从事“3S”技术应用及资源监测研究。E-mail: 976426265@qq.com。通信作者: 刘健, 教授, 博士, 从事“3S”技术应用、资源监测与林业可持续经营研究。E-mail: fjliujian@126.com

0.3%). Ecological vulnerability in the study area was mainly in Zone II ($0.2 < I_{EV} \leq 0.4$) and Zone III ($0.4 < I_{EV} \leq 0.6$). The areas of low vulnerability were mainly distributed in the central parts of the study region; whereas, areas of high vulnerability were located around the edges. The vulnerability of different functional areas differed with landscape and recreation mainly belonging to Zone IV ($0.6 < I_{EV} \leq 0.8$), soil and water conservation as well as the overlapping area of water conservation with soil and water conservation belonging to Zone III, and water conservation belonging to Zone II. There was almost a high coupling between each function and the corresponding vulnerability zone. Thus, there was a close relationship. The study has a guidance for the optimization of land use in the Jinsiwan Forest Park and maintaining ecological health and stability. [Ch, 4 fig. 5 tab. 21 ref.]

Key words: ecology; functional regionalization; ecological vulnerability; coupling of functional utilization and ecological vulnerability; forest park

随着土地利用变化的深入研究,生态脆弱性已成为土地利用变化研究的重点内容。土地利用类型、方式和结构等变化引发地表径流、土壤侵蚀、滑坡等自然现象,使得该类型区域同其他地区相比表现出更严重的生态脆弱性^[1]。生态脆弱性是生态系统在特定时间、空间尺度下受到外界干扰时所具有的敏感程度,是生态环境在干扰作用下所呈现的固有属性,是自然因素和人为因素共同作用的结果^[2-3]。区域生态脆弱性评价不仅可以了解研究区各功能区的脆弱性分布特征,还有助于合理规划土地利用类型和保护脆弱生态环境^[4]。目前,土地利用总体规划的核心内容是土地利用分区,功能分区是土地利用总体规划的主要内容^[5]。关于土地利用功能区划的研究很多,却存在“规划分区”是否科学化的问题^[6],影响着功能分区的应用效果。功能区的利用能够全面地反映区域生态环境分异特征^[7],直接成为土地生态环境好坏的决定性因素^[8]。生态脆弱性能够体现功能区利用对生态环境产生影响的程度,探讨各功能区生态脆弱性的分布特征,对功能区的利用和加强土地资源的保护具有重要的意义。因此,如何确定生态脆弱性,尤其是在功能区划的前提下确定生态脆弱性,需要对功能区划与生态脆弱性进行耦合分析,但这方面的研究却少见报道。森林公园具有独特的自然景观和悠久的历史,被纳入重点生态区位的生态公益林,本身具备森林资源的保护、水源涵养、水土保持和景观游憩功能,但当前生态公益林经营的基础理论与实践整体较为薄弱,尤其是生态公益林经营管理中的区位生态环境功能定位尚不明确。因此,研究探讨福建省三明市金丝湾森林功能理念、适宜性的功能分区及相应区域的生态脆弱性空间分布特征,对森林公园的功能区划及充分利用具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金丝湾森林公园位于福建省三明市梅列区陈大镇林业采育场内,面积达 151.7 km²,位于 26°18'~26°21'N, 117°31'~117°37'E,地处福建省中西北部,毗邻瑞云山风景区,是省级森林公园,属于福建省重点生态区位,现有天一山庄、天谷山庄、森林人家 3 个农庄,1 个森林氧吧。金丝湾森林公园海拔为 189~698 m,以低山和丘陵为主,属中亚热带季风气候,四季分明,雨水充沛;园内天然林层次分明,植被类型主要以常绿针叶林、常绿阔叶林以及针阔混交林为主,并纳入风景林林种;土壤表现为典型地带性分布规律,成土母质以花岗岩、流纹岩、火山岩为主,土壤类型主要是酸性岩红壤、黄壤、棕黄壤等;森林公园经营以提升生态功能为主,2015 年获评省级生态文明教育基地。

1.2 数据材料收集及预处理

基础数据包括福建省三明市梅列区 2014 年 12 月 13 日轨道号为 054577939010_01,全色波段分辨率为 0.3 m 的 Worldview-3 遥感影像数据;金丝湾森林公园 1:1 万数字高程模型(DEM)数据、小班数据库和 1:1 万地形图等。

数据预处理:利用 ERDAS 9.2 将 Worldview-3 遥感影像与地形图进行配准,并提取金丝湾森林公园,再对研究区遥感影像进行目视解译,获取水体、道路信息;从 DEM 数据中提取坡度;所有数据使用统一的 Beijing 1954 坐标和 Transverse Mercator 投影,栅格大小为 0.3 m × 0.3 m。

1.3 功能区类型确定与划分

功能区划遵循可持续发展、整体性、相似性与差异性和发生学等原则^[9]。金丝湾森林公园位于重点生态区位，同时又是当地重要的水源汇水区，因而承担重要的涵养水源功能；位于福建省沿海区域，靠近内陆，常受台风气候影响，在全球气候变化的影响下，暴雨是影响研究区最大的气象灾害之一，尤其在春夏2季暴雨频发，强降雨持续时间长，容易引起水土流失，当地以红壤为主，需要部分森林发挥水土保持功效；由于森林公园包含风景林，可满足人们娱乐、休憩和观赏等需求，因而初步把研究区划分为水源涵养区、水土保持区和景观游憩功能区。根据《森林资源规划设计调查技术规定》^[10]对研究区功能区进行划分，对未区划的小班建立多功能评价体系^[11]，确定未划定小班的主导功能，实现森林公园功能区的区划。具体公式： $X_i^r = \sum_{j=1}^n X_{ij} W_j$ 。其中： i 代表小班编号， j 代表森林功能评价指标编号； r 代表森林主要功能编号， X_i^r 表示小班的功能得分， X_{ij} 表示小班功能评价指标得分。然后利用算式对各小班的评价得分进行标准化： $Z_i^r = (X_i^r - \bar{X}_i^r) / S_i^r$ 。其中： Z_i^r 表示标准化后的各小班功能得分， \bar{X}_i^r 表示各小班各项功能得分的平均值， S_i^r 为各小班功能评价价值的标准差。

1.4 生态脆弱性的测定

1.4.1 指标选择 指标选择是构成生态脆弱性评价指标体系的关键，生态脆弱性能否反映研究区的真实状况取决于指标体系的建立^[12]。自然因素是造成区域生态环境脆弱的内在因素，包括地形、土壤、植被、气候等多种因素。坡度是导致生态脆弱性的重要因子，坡度越大越容易导致水土流失；植被覆盖度是植被稀疏的体现，可间接反映植被的生长状态，而且其空间分异对区域的水土保持、水源涵养等具有保障作用，从而反映功能区的生态脆弱性。由于研究区域较小，气候因子对研究区的影响整体相似，土壤类型更是以红壤为主，类型单一，对生态脆弱性的影响没有明显差别。另外，人类活动不断地干预并作用于区域生态环境，合理的干预能促进区域生态环境的可持续发展，不合理的人类活动则会导致生态环境脆弱性的发生。森林公园作为游憩的场所，人为活动强度大，尤其是游览道路的周边表现尤为明显。因而，针对研究区的自然条件及人为干扰状况，选取坡度、植被覆盖度和人为干扰因子(距道路的平均距离 100 m^[13])3个指标作为研究区生态脆弱性的评价指标(表1)。

表1 生态脆弱性评价指标描述及来源

Table 1 Description and source of ecological vulnerability evaluation indices

指标	指标提取及计算	来源
植被覆盖度	利用归一化植被指数(NDVI)基于混合像元法计算 ^[14]	Worldview-3 遥感影像数据
坡度/(°)	数字高程模型(DEM)坡度提取	30 m SRTM DEM, 地理空间数据云
人为干扰因子(距道路的平均距离 100 m)	利用最大似然监督分类提取	Worldview-3 遥感影像数据

1.4.2 评价指标权重的确定 目前，确定指标权重的方法有许多，常见的有层次分析法、主成分分析法、熵值法、灰色关联法、指标值法、相对系数法等。其中使用最广泛的是层次分析法，它是一种定性分析与定量分析相结合的多准则决策方法，并将一个复杂的多目标决策问题的有关元素分解成目标、决策、准则、方案等层次，将各种复杂因素逐层分析^[15]，考虑到构建生态脆弱性评价及后期构建功能评价体系，本研究使用该法来确定各指标的权重。

1.4.3 脆弱性测定方法 采用综合评价法^[16]对金丝湾森林公园进行生态脆弱性评价，并将研究区生态脆弱性划分为5个等级： $0 \leq I_{EV} \leq 0.2$ 为Ⅰ级， $0.2 < I_{EV} \leq 0.4$ 为Ⅱ级， $0.4 < I_{EV} \leq 0.6$ 为Ⅲ级， $0.6 < I_{EV} \leq 0.8$ 为Ⅳ级， $0.8 < I_{EV} \leq 1.0$ 为Ⅴ级。为消除指标量纲不统一的问题，采用标准化数据^[17]。具体评价模型见式(1)。

$$I_{EV} = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (1)$$

式(1)中： I_{EV} (eco-environment vulnerability index)为第*i*个评价因子的生态脆弱指数，其值为0~1； x_i 为第*i*个因子指标， a_i 为各评价因子的权重，用层次分析法求出。

1.5 功能利用与生态脆弱性的耦合

耦合度是反映系统之间相互作用和相互影响的衡量尺度^[18]，其值为0~1，值越大，说明功能利用与

生态脆弱性的关系越强, 值越小, 说明两者关系越弱, 向无序混乱方向发展。因此, 本研究用耦合度来定量描述金丝湾重点功能区和生态脆弱性之间耦合特征, 从而评价金丝湾功能区划分的合理性。用 $f(x)$ 和 $g(y)$ 分别表示功能利用^[19]与生态脆弱性的评价函数, 则耦合度函数为

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

式(2)中: c 是耦合度; $f(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i$; $g(y) = \sum_{j=1}^n b_j y_j$; a_i 与 b_j 分别表示功能利用与生态脆弱性各指标的权重; x_i 与 y_j 分别是功能和脆弱性的指标值。为辨别各阶段的耦合特征, 依据耦合度划分为: $0 \leq c \leq 0.49$ 表示不耦合, $0.50 \leq c \leq 0.59$ 表示勉强耦合, $0.60 \leq c \leq 0.69$ 表示初级耦合, $0.70 \leq c \leq 0.79$ 表示中级耦合, $0.80 \leq c \leq 1.00$ 表示高级耦合。

2 结果与分析

2.1 功能区划分结果分析

根据《森林资源规划设计调查技术规定》的划分结果, 最终确定研究区功能区类型为水源涵养区、水土保持区、水土保持和水源涵养重叠区、景观游憩区, 但是通过与小班图层的叠加发现, 还剩 149 个小班未得到合理划分。为实现研究区功能区划的完整性, 根据 1.3 节中的算式对未区划小班进行划分, 其中景观游憩区参考张瑞^[20]的研究不再划分, 只对水土保持区和水源涵养区进行划分(表 2)。最终整体区划的结果如图 1。由图 1 可知: 金丝湾森林公园主要划分为水源涵养功能区、水土保持功能区、水土保持和水源涵养重叠功能区、景观游憩功能区。整体呈块状分布的特点, 水土保持功能区主要分布在研究区中部, 水源涵养功能区主要分布在研究区四周, 部分分布在中部, 水土保持和水源涵养重叠功能区主要分布在水土保持区和水源涵养区的交界处, 景观游憩功能区主要分布在研究区东北、西南和西北处。其中, 水土保持功能区主要发挥防止水土流失、维持土壤养分等功能, 其面积最大, 有 844.91 hm^2 , 占总面积的 47.63%; 水源涵养功能区主要发挥涵养水源、河流补给和水量调节等功能, 面积为 631.01 hm^2 , 占总面积的 35.57%; 水土保持和水源涵养重叠功能区既能发挥水土保持功能, 又能发挥水源涵养功能, 面积为 212.00 hm^2 , 占总面积的 12.20%; 景观游憩功能区主要供人们休闲娱乐, 进行科学、文化活动等, 其面积仅 42.84 hm^2 , 占总面积的 2.41%。

表 2 部分小班评价得分和主导功能的确定

Table 2 Partial sublots evaluation scores and the determination of the main function

小班编号	水源涵养得分(B1)	水土保持得分(B2)	主导功能
1	0.750 0	1.266 3	B2
2	0.397 7	0.143 3	B1
……	……	……	……
148	0.528 3	1.226 5	B2
149	1.625 0	2.809 0	B2

2.2 生态脆弱性结果分析

从研究区生态脆弱性等级分布来看(图 2), 研究区生态脆弱性的空间格局主要呈中心偏低, 四周偏高的分布特征, V 级生态脆弱区主要分布在研究区东部和西部, IV 级生态脆弱区主要分布在研究区东南部, 这些区域主要分布在居民区旁边, 受人为干扰比较严重; 研究区中心和北部零星分布着 I 级生态脆弱区, 主要是由于植被盖度高, 人为干扰比较少, 最终导致生态脆弱性程度低。由表 3 可知: 研究区生态脆弱性在 I 和 V 级生态脆弱区面积分别为 34.43 hm^2 和 6.41 hm^2 , 仅占总面积 1.98% 和 0.37%, 在 II 级和 III 级生态脆弱区, 面积分别为 750.44 hm^2 和 771.11 hm^2 , 占研究区总面积比例分别为 43.18% 和 44.37%。该区域植被以阔叶树和针叶树为主, 植被盖度高, 但是坡度相对较陡, 不易水土保持, 生态脆弱等级相对较高; 在 IV 级生态脆弱区, 面积和比例分别为 175.51 hm^2 和 10.10%, 说明研究区生态脆弱性有向 IV 级发展的趋势, 但整体生态脆弱性趋于良好。

2.3 功能区利用与生态脆弱性的耦合分析

2.3.1 不同功能区生态脆弱性分布特征 通过研究区功能区空间分布与生态脆弱性空间分布的叠加统计分析, 提取了不同功能区的生态脆弱性特征(表 4)及在生态环境脆弱等级条件下分布特征(图 3)。4 个

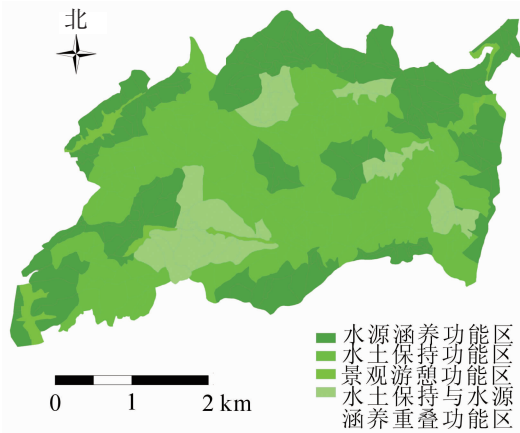


图 1 研究区功能区分布

Figure 1 Distribution function zone in the study area

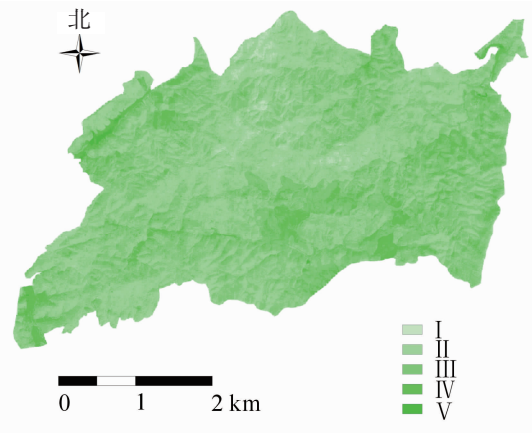


图 2 研究区生态脆弱性等级空间分布

Figure 2 Spatial distribution of ecological vulnerability levels in the study area

功能区生态脆弱指数值为 0.41~0.60，属于Ⅲ级和Ⅳ级，没有出现Ⅴ级生态脆弱性高的功能区，但个别功能区在Ⅴ级脆弱略有分布。景观游憩区生态脆弱性分布特征与其他 3 个功能区有明显区别，有 50.61% 的区域为Ⅳ级生态脆弱区，28.71% 的区域为Ⅲ级生态脆弱区，有 5.98% 的区域为Ⅴ级生态脆弱区，主要由于景观游憩区生物多样性较低，靠近道路，人为干扰较为强烈，受旅游影响较大。水土保持区、水土保持和水源涵养重叠区、水源涵养区 3 个功能区均属于Ⅲ级生态脆弱区，前两者在各级生态脆弱区分布特征基本一致，分别有 42.15% 和 43.12% 的区域属于Ⅱ级生态脆弱区，有 46.50% 和 48.60% 为Ⅲ级生态脆弱区，无Ⅴ级生态脆弱区。水土保持区、水土保持和水源涵养重叠区植被覆盖度高，其中水土保持区域本身存在水土流失现象，坡度较大，水土保持和水

源涵养重叠区虽靠近道路，但不仅具备水土保持的功能，还有水源涵养的性质，因而两者脆弱性分布特征相似。水源涵养功能区有 46.70% 的区域为Ⅱ级生态脆弱区，40.96% 的区域为Ⅲ级生态脆弱区，由于景观游憩区多数位于水源涵养功能区旁，使得水源涵养区受到一定程度人为干扰影响，但因其本身为汇水区，植被覆盖度相对较高，坡度较缓，保证了涵养水源功能，生态脆弱性等级相对其他功能区略低。

2.3.2 不同生态脆弱性等级功能区分布特征 通过研究区生态脆弱性空间分布和功能区分布的叠加统计分析，提取了不同生态环境脆弱性条件下生态功能类型面积和比例(表 5)。在Ⅰ级生态脆弱区主要是水源涵养功能区，面积和比例分别为 21.9 hm² 和 63.61%，该区域植被覆盖度高，地形平缓；Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级生态脆弱区以水土保持区和水源涵养功能区为主，面积分别为 345.55，386.21，82.06 hm² 和 307.91，269.68，56.97 hm²，比例分别为 46.05%，50.08%，46.75% 和 41.03%，34.97%，32.45%；Ⅴ级生态脆弱区主要以景观游憩功能和水源涵养功能区为主，面积分别为 2.56 和 2.85 hm²，比例分别为 38.15% 和 42.47%，景观游憩功能区是以水域为主，水源涵养功能区是水库和湖泊周围山地自然地形的第 1 层山脊以内的森林，或周围平地 250 m 以内的森林和林地，受到人为干扰影响比较大。

2.3.3 功能利用与生态脆弱性的耦合分析 Ⅰ级生态脆弱性和 4 个功能区的耦合度均小于 0.40(图 4)；水土保持功能区、水土保持与水源涵养重叠功能区和水源涵养功能区三者与生态脆弱性的耦合度趋势一

表 3 研究区生态脆弱性等级统计

Table 3 Statistics of ecological vulnerability levels in the study area

生态脆弱性等级	面积/hm ²	比例/%
I	34.43	1.98
II	750.44	43.18
III	771.11	44.37
IV	175.51	10.10
V	6.41	0.37
合计	1 737.90	100

表 4 不同功能区生态脆弱性评价

Table 4 Ecological vulnerability evaluation of different functional zones

功能区	生态脆弱指数	生态脆弱性评价等级
水源涵养区	0.41	Ⅲ
水土保持区	0.43	Ⅲ
水土保持和水源涵养重叠区	0.42	Ⅲ
景观游憩区	0.60	Ⅳ

表5 不同生态脆弱性等级功能区的面积和比例

Table 5 Areas and proportions of function zones in different ecological vulnerability levels

功能区	I		II		III		IV		V	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
水源涵养区	21.90	63.61	307.91	41.03	269.68	34.97	56.97	32.45	2.85	42.47
水土保持区	9.82	28.08	345.55	46.05	386.21	50.08	82.06	46.75	1.21	18.03
水土保持和水源涵养重叠区	2.62	7.49	91.31	12.17	102.92	13.35	14.83	8.45	0.09	1.34
景观游憩区	0.63	1.80	5.67	0.76	12.30	1.60	21.68	12.35	2.56	38.15
合计	34.97	100	750.44	100	771.11	100	175.54	100	6.71	100

致,与II和III级生态脆弱性均属于高级耦合,相对景观游憩功能的发挥,生态环境处于良好状态,表明这3个功能的充分发挥有利于改善生态环境,降低生态脆弱性等级,由于3个功能区在IV级分布较少,但与IV级生态脆弱性属于高级耦合关系,说明少量的功能区没有充分发挥作用;景观游憩区与II级生态脆弱性处于中级耦合,与III,IV和V级生态脆弱性属于高级耦合,说明景观游憩功能的利用使所在区域的生态环境遭到了破坏,与生态环境现状相吻合。研究区整体耦合程度属于高级水平,表明功能利用与生态脆弱性之间关系紧密,相互作用程度较高,功能区的合理利用有助于减缓生态脆弱性。功能合理划分、充分利用是更好地优化土地利用类型的体现,是降低生态脆弱性的关键。

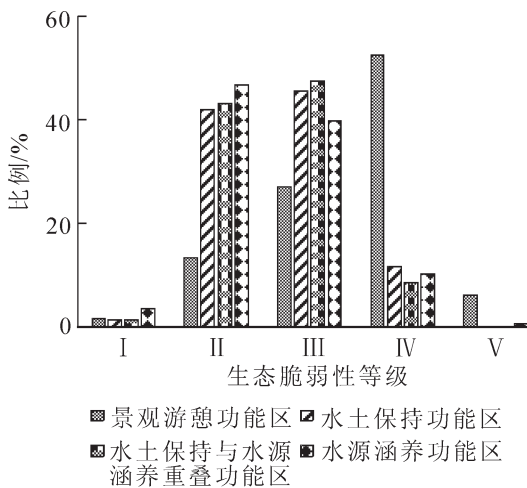


图3 不同功能区生态脆弱性空间分布特征

Figure 3 Spatial distribution characteristics of ecological vulnerability of different functional zones

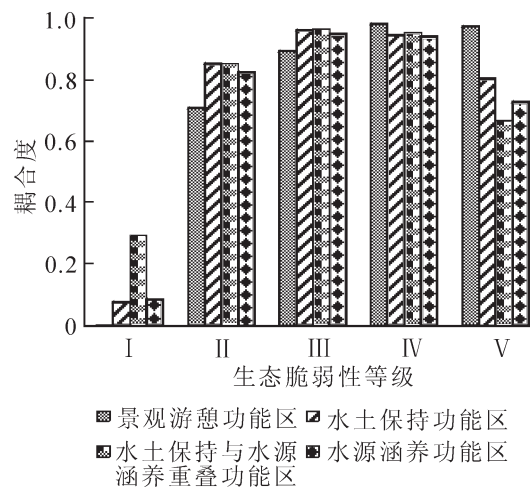


图4 生态脆弱性与功能利用的耦合特征

Figure 4 Coupling characteristics of ecological vulnerability and functional utilization

2.3.4 不同脆弱性功能分区的生态建设应对措施 为实现森林公园可持续发展,提高不同脆弱性功能分区的生态环境,应着重从以下几个方面进行生态调控:针对生态脆弱性呈IV级的景观游憩功能区,应以风景休闲为主,提倡以大自然为依托,强调旅游对象的自然性和生态性,发展与生态环境治理密切相关的生态林业旅游,并制定有关森林公园自然资源和生态环境保护细则,加强生态环境知识的普及和宣传工作,增强游客的生态环境保护意识,禁止一切可能破坏景物和自然环境的行为;其余功能分区,包括水土保持和水源涵养功能区,以及两者的重叠区域,生态脆弱性均以III级为主,这与前期森林采伐、抚育失调、坡地开荒等有关,应大力栽植根系发达、具有涵养水源功能的树种,采取抚育更新等人工促进生态恢复;有直接汇水作用的林地和重要的水域应为禁止采伐区域,并蓄水保水。不同生态脆弱性功能分区的生态建设应因地制宜进行生态调控与建设。

3 结论与讨论

金丝湾森林公园不仅是生态公益林,而且是福建省三明市重点生态区位,针对生态公益林的多功能需求,进行适应重点生态区位的多功能区划,是促进森林资源有效功能利用的重要基础。本研究以生态公益林本身存在的水土保持和水源涵养功能为主体,结合森林公园具有的游憩价值,探讨了研究区的功

能区划,并最终将研究区划分为水源涵养功能区、水土保持功能区、水土保持和水源涵养重叠功能区、景观游憩功能区,其中水源涵养功能区和水土保持功能区的比例较大,景观游憩功能区比例较小,这与金丝湾森林公园的经营类型及自然条件有关。依据相关规定进行区划,存在水土保持和水源涵养重叠区,部分区域采用小班划分,功能区的区划过程有效地避免了功能区重叠和遗漏的不足等问题,实现了研究区对功能区的有效划分,更客观地反映了区域的相似性和差异性。

景观游憩功能区与其他3个功能区生态脆弱性有明显区别,主要属于V级生态脆弱区,水源涵养功能区、水土保持功能区、水土保持和水源涵养重叠功能区主要分布在II和III级生态脆弱区。从研究结果来看,整体准确合理地反映了研究区生态脆弱性特征。因此,研究探讨不同功能区生态脆弱性空间分布特征,揭示森林公园的区位环境内在要素与联系,对发挥水源涵养功能、水土保持功能、水土保持和水源涵养重叠功能、景观游憩功能具有重要的推进作用。通过耦合分析显示,功能利用对生态环境的影响突出,研究区整体主要处于II和III级生态脆弱区,揭示了功能利用与生态环境之间相互作用和影响的复杂关系。影响生态脆弱性的因素很多,包括自然因素和人为因素。自然因素涉及地貌、水文,还涉及气候因素,特别是全球气候变化会直接导致森林生态系统结构与功能的变化^[21],进而影响人类生存与发展;人为因素指人类活动干扰,其中人为干扰下的土地利用类型的变化是造成生态脆弱性问题的主要因素。金丝湾森林公园功能划分是否合理取决于今后森林公园各功能区在土地利用的基础上能否充分发挥作用。因此,今后应加强全球气候变化和土地利用功能分区对森林公园生态环境的机理研究,优化土地利用,充分发挥森林公园功能效应,为森林公园的可持续发展提供决策依据。

4 参考文献

- [1] 周岩,张艳红,翟羽娟.基于土地利用变化的辉南县生态脆弱性时空变化分析[J].国土与自然资源研究,2013(6):29-32.
ZHOU Yan, ZHANG Yanhong, ZHAI Yujuan. Analysis of ecological vulnerability based on land-use changes in mountain plain transition zones [J]. *Terr Nat Res Study*, 2013(6): 29 - 32.
- [2] 王让会,樊自立.塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J].干旱环境监测,1998,12(4):218-223.
WANG Ranghui, FAN Zili. Study on ecological vulnerability assessment in Tarim River Basin [J]. *Arid Environ Monitor*, 1998, 12(4): 218 - 223.
- [3] 卢亚灵,颜磊,许学工.环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J].资源科学,2010,32(2):303-308.
LU Yaling, YAN Lei, XU Xuegong. Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai Rim Region [J]. *Res Sci*, 2010, 32(2): 303 - 308.
- [4] 廖炜,李璐,吴宜进,等.丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J].自然资源学报,2011,26(11):1879-1889.
LIAO Wei, LI Lu, WU Yijin, et al. Land use change and eco-environmental vulnerability evaluation in the Danjiangkou Reservoir Area [J]. *J Nat Res*, 2011, 26(11): 1879 - 1889.
- [5] 陈星怡,杨子生.土地利用功能分区若干问题探讨:以云南德宏州为例[J].自然资源学报,2012,27(5):845-855.
CHEN Xingyi, YANG Zisheng. Preliminary approach to several issues about regional division of land use function: a case study in Dehong Dai-Jingpo Autonomous Prefecture, Yunnan Province [J]. *J Nat Res*, 2012, 27(5): 845 - 855.
- [6] 王向东,张恒义,刘卫东,等.论土地利用规划分区的科学化[J].经济地理,2015,35(1):7-14.
WANG Xiangdong, ZHANG Hengyi, LIU Weidong, et al. Scientifics of land use planned regionalization [J]. *Econ Geogr*, 2015, 35(1): 7 - 14.
- [7] 张洁瑕,陈佑启,姚艳敏,等.基于土地利用功能的土地利用分区研究:以吉林省为例[J].中国农业大学学报,2008,13(3):29-35.
ZHANG Jiexia, CHEN Youqi, YAO Yanmin, et al. Study on land use regionalization based on land: use function: case study of Jilin Province [J]. *J China Agric Univ*, 2008, 13(3): 29 - 35.
- [8] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报,2014,69(1):54-63.

- WU Linna, YANG Shengtian, LIU Xiaoyan, *et al.* Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976 [J]. *Acta Geogr Sin*, 2014, **69**(1): 54 – 63.
- [9] 王传辉, 吴立, 王心源, 等. 基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5808 – 5817.
- WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, *et al.* RS-and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5808 – 5817.
- [10] 国家林业局. 森林资源规划设计调查技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 8 – 11.
- [11] 刘波云, 赵静, 刘东兰, 等. 金沟岭林场森林多功能评价指标体系构建[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(12): 158 – 161.
- LIU Boyun, ZHAO Jing, LIU Donglan, *et al.* Construction of multi-functional evaluation system for Jingouling Forest Farm [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(12): 158 – 161.
- [12] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 7117 – 7129.
- MA Jun, LI Changxiao, WEI Hong, *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(21): 7117 – 7129.
- [13] 赵静, 刘东兰, 郑小贤, 等. GIS 在金沟岭林场森林多功能评价中的应用[J]. 西北林学院学报, 2010, **25**(6): 207 – 209.
- ZHAO Jing, LIU Donglan, ZHENG Xiaoxian, *et al.* Application of GIS to the evaluation of multi-function of Jingouling Forest Farm [J]. *J Northwest For Univ*, 2010, **25**(6): 207 – 209.
- [14] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(11): 2896 – 2903.
- LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(11): 2896 – 2903.
- [15] 白艳芬, 马海州, 张宝成, 等. 基于遥感和 GIS 技术的青海湖环湖地区生态环境脆弱性评价[J]. 遥感技术与应用, 2009, **24**(5): 635 – 641.
- BAI Yanfen, MA Haizhou, ZHANG Baocheng, *et al.* Eco-environmental vulnerability analysis around Qinghai Lake based on RS and GIS technology [J]. *Rem Sens Technol Appl*, 2009, **24**(5): 635 – 641.
- [16] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 735 – 745.
- YAO Xiong, YU Kunyong, LIU Jian, *et al.* Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, Southern China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(3): 735 – 745.
- [17] 钟晓娟, 孙保平, 赵岩, 等. 基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(1): 109 – 113.
- ZHONG Xiaojuan, SUN Baoping, ZHAO Yan, *et al.* Ecological vulnerability evaluation based on principal component analysis in Yunnan Province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, **20**(1): 109 – 113.
- [18] 孙平军, 丁四保, 修春亮. 北京市人口-经济-空间城市化耦合协调性分析[J]. 城市规划, 2012, **35**(5): 38 – 45.
- SUN Pingjun, DING Sibao, XIU Chunliang. Analysis of the coordination of population-economy-space in Beijing [J]. *City Plan Rev*, 2012, **35**(5): 38 – 45.
- [19] 赵学明. 基于 GIS 北京山区森林多功能评价指标体系构建: 以八达岭林场为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- ZHAO Xueming. *The Constlution of GIS-based Multi-functional Evaluation System of Beijing Mountain Forest: Example for Badaling Tree Farm* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [20] 张瑞. 基于 GIS 的灵石山国家森林公园功能区划研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- ZHANG Rui. *Study on the Function Regionalization in Lingshi Mountain National Forest Park Based on GIS* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [21] 严力蛟, 杨伟康, 林国俊, 等. 气候变暖对森林生态系统的影响[J]. 热带地理, 2013, **33**(5): 621 – 627.
- YAN Lijiao, YANG Weikang, LIN Guojun, *et al.* Impact of global warming on forest ecosystem [J]. *Trop Geogr*, 2013, **33**(5): 621 – 627.