

DOI: 10.5846/stxb201407201474

高俊刚, 吴雪, 张镔铨, 刘林山, 王兆锋, 姚治君. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Gao J G, Wu X, Zhang Y L, Liu L S, Wang Z F, Yao Z J. Ecological function regionalization in the lower Jinsha River Basin using analytic hierarchy process method. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区

高俊刚^{1,2}, 吴 雪^{1,3}, 张镔铨^{1,3,*}, 刘林山¹, 王兆锋¹, 姚治君¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 Kansas State University, Manhattan, KS 66502, USA

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:金沙江下游地区是我国西南重要的生态环境保护区域,也是我国未来水电建设的重要区域,在西南民族经济和区域可持续发展等方面都具有十分重要的战略意义。该地区水能资源开发潜力巨大,是我国重要的能源基地,但是该地区生态环境相对脆弱。为了保护这些脆弱生态环境的地区,尽管国家和大多数省级层次的生态功能分区已经制定并颁布和实施,但是如何探索和制定区域、流域尺度的生态功能分区研究却为数不多。而大尺度的生态功能分区研究并不一定非常适合这一具体流域实际情况,所以小尺度典型流域的生态功能分区探索是非常必要的。本研究基于金沙江下游地区的生态环境特征,运用空间分析的方法和技术,采用定性和定量分析相结合的等级层次分析法,对金沙江下游地区进行了生态功能分区。结果表明:金沙江下游地区可划分为 2 个生态区、6 个生态亚区和 29 个生态功能区;以流域尺度上水源涵养、水土保持和生物多样性保护为主导生态系统功能,进行了重要生态功能分区,确定了金沙江下游地区具有重要意义的 19 个重要生态功能区域。该重点区域的划分对金沙江下游地区生态安全具有重要生态意义,可用于指导金沙江下游地区自然资源的有序开发利用和产业布局的合理配置,为金沙江下游地区生态环境保护提供科学依据,对维护金沙江下游地区的水电生态安全提供重要指导。

关键词:金沙江下游;生态适宜性;生态敏感性;生态系统服务;生态功能分区

Ecological function regionalization in the lower Jinsha River Basin using analytic hierarchy process method

GAO Jungang^{1,2}, WU Xue^{1,3}, ZHANG Yili^{1,3,*}, LIU Linshan¹, WANG Zhaofeng¹, YAO Zhijun¹

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Kansas State University, Manhattan, KS 66502, USA

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The lower Jinsha River Basin (LJRB) is an important protected area in the regional environments and ecosystems in the southwest of China. It is also a key region for future hydroelectric development and is of great strategic significance for national economy and regional sustainable development. Although the LJRB is one of vital energy bases in China for its huge potential hydropower resources, the region's ecosystems are very fragile. In order to protect these ecologically fragile environments, eco-regionalization based on ecological function at national scale has been recently formulated, promulgated, and implemented; however, only few studies have addressed ecological regionalization at basin scale. It was assumed that the eco-regionalization at the national scale could not be applied equally and accurately to the local eco-regionalization. Therefore, we tested whether national eco-regionalization could be used at the small, regional scale, and sought appropriate

基金项目:国家科技支撑项目(2012BAC06B02);中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030500)

收稿日期:2014-07-20; **网络出版日期:**2015-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyl@igsrr.ac.cn

eco-regionalization plan applicable at a specific scale. This research on regionalization based on ecological function was carried out in the LJRB by incorporating spatial analysis methods in remote sensing and GIS and qualitative and quantitative analytic hierarchy process (AHP) analyses in the process of regionalization in accordance with the local climate, topography, and ecological environment. The LJRB was divided into two eco-regions and six sub-eco-regions composed of 19 eco-functional zones. Furthermore, these 19 critical eco-functional zones were delineated by synthetically analyzing dominant eco-functions, involving conservation of water and soil, and conservation of biodiversity in the LJRB. The results indicated that regionalization in the LJRB is very important for the local ecological sustainability. This study will help to exploit and allocate natural resources orderly, rationally guide the land planning for industries, as well as provide scientific support for protecting the environment and maintaining ecological security of hydroelectric development in the LJRB.

Key Words: Lower Jinsha River Basin; ecological suitability, ecological sensitivity, ecosystem service, ecological function regionalization

生态区域划分(生态区划)是在自然区划的基础上发展而来的。它经历了从自然分区到功能分区的发展,研究对象从以自然要素为基础发展到以生态系统为基础^[1]。生态功能是生态系统的属性,生态功能区划主要考虑生态、地理和气候的空间分异特征^[2]。根据区域生态系统类型、生态敏感性和生态系统服务功能重要性的空间分异规律,生态功能区划可对区域生态功能进行地理空间分区^[3]。自 19 世纪初以来,开始提出地表自然区划和主要单元内部逐级分区概念,以及后来现代自然区划研究的开创^[4],直到首次真正意义上的生态区划实施,经历了一个不断完善和发展的过程。Bailey (1976) 提出了美国真正意义上的生态分区等级系统^[5]。我国于 2002 年发布了《生态功能区划技术暂行规程》^[6],2008 年环境保护部和中国科学院发布了《全国生态功能区划》^[7],是国际上首次提出了基于生态系统服务功能的生态功能区划思路和区划方法,并完成的国家尺度生态功能区划方案,同时对于区域生态系统管理以及区域发展战略提供了指导和借鉴。但这些研究均是在全国或各省市行政区划尺度上进行的生态功能区划^[3, 8],而对于反映流域尺度特征生态功能环境现状、生态环境敏感性和生态功能重要性在空间上的异质性存在一定的不足,其区划方案也很难直接用于当地生态保护和生态建设方案的实施。因此,建立以流域为尺度单元的生态功能区划理论框架和例证,将会更加有效和具体地均衡各方冲突^[9]。有针对性地开展具体实地生态系统结构、过程和功能演变的研究,查明生态系统具体区划方案对流域生态系统的影响,将为流域生态系统的可持续发展奠定理论基础。

目前,对于流域生态功能规划的研究,生态环境敏感性和生态系统服务功能对流域是两个重要的方面,一些研究基于这两方面进行生态功能分区^[10];也有研究基于具体流域生态系统的时空演化规律,并对流域水生态功能的主要驱动因子进行了辨识,最后进行流域生态功能分区^[11];或者应用生态系统某些重要的指标,比如河道生境维持功能,生态系统多样性维持功能,珍稀物种维持功能和特征物种维持功能来进行流域生态功能分区^[12]。另外,也有采用因素分析法,通过对流域主要组分进行分析之后,再对流域划分生态功能区^[13]。这些研究在一定程度上为定量和定性开展全方位生态功能评价和分区奠定了基础。但是,如何能够运用定量地将众多因素进行科学的综合,在具体流域尺度进行合理的生态功能规划尚待深入研究。总结以上研究,在金沙江下游地区开展了进一步生态功能评价和分区的研究。

金沙江下游地区是我国西南重要的、最需要保护的生态环境和自然区域,也是长江经济产业带的重要组成部分,在西南地区生态环境建设、民族经济和区域可持续发展等方面都具有十分重要的战略意义。一方面,金沙江下游地区水能资源开发潜力巨大,是我国重要的能源基地,同时攀西—六盘水地区又是我国资源最富集的地区之一,农业、矿产和旅游资源都极其丰富;另一方面,这一地区少数民族分布较多,生态环境脆弱,产业经济发展水平较低^[14]。尽管国家和大多数省级层次的生态功能区划已经制定并颁布和实施,但是如何探索和制定区域、流域层次的生态功能分区却很少在该区进行开展。而本地区是重要的生态环境保护区域,大尺度的研究并不一定非常适合该区域的具体实际,所以具体流域的生态功能分区探索是非常必要的。本研究

通过对金沙江下游地区生态系统进行生态功能评价和分区,在流域尺度上,建立评价生态适宜性、生态环境敏感性、以及生态系统服务功能重要性等指标体系;对各类生态系统特征和功能类型进行定量评价;基于这些分析对金沙江下游地区进行生态功能分区,并对金沙江下游地区重要生态功能区的主要环境问题进行分析,为指导金沙江下游地区生态环境保护和生态建设、因地制宜地进行产业结构布局及协调下游地区社会经济发展提供科学依据,为区域生态系统管理提供理论框架。

1 研究区域概况

金沙江下游地区($100^{\circ}57'—104^{\circ}38'E$, $24^{\circ}29'—28^{\circ}53'N$)指从攀枝花市(雅砻江注入金沙江的汇口处)至宜宾(岷江注入金沙江的汇口处)段的金沙江流域(图1)。研究区地质构造复杂,地层褶皱、断裂发育,海拔249—4313 m,呈西南向东北倾斜的狭长型。区内金沙江主干流长约782 km。流经云南、四川、贵州3个省,包括10个地级市(共58个县),流域总面积约 8.8×10^4 km²。研究区内气候为亚热带季风湿润气候,多年平均降水量为893 mm,水量丰沛稳定,地形落差大,水能蕴含量极大,向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德四大水电站均分布在这一区域。区域内植物属亚热带常绿阔叶林植物,植物种类繁多。金沙江下游地区地处边远山区,少数民族聚居,由于受历史、地理等诸多条件的限制,区域生产力水平低,经济发展缓慢,相当部分还处在国家贫困线以下。金沙江下游地区的发展需要依靠当地的资源优势,结合水能开发的契机促进自身产业发展。同时更应该注重当地环境资源的可持续发展。而通过合理的生态功能分区开展相应的经济发展和规划策略,对于当地资源环境的可持续发展就有着非常重要的指导意义^[14]。金沙江下游是长江流域生态环境脆弱的地区

之一,也是长江最大的泥沙产沙区,据观测资料显示,金沙江下游多年平均输沙量约占长江宜昌站沙量的41%;林地、灌草地和耕地是金沙江下游地区主要的土地覆被类型,其中过度的开荒垦地尤其陡坡耕种,加上该地区干热气候条件,是本区生态环境脆弱和退化的主要诱导因素。另外,由于滑坡和泥石流的影响,在干流河谷和小江流域的生态环境恶化较为严重^[15]。

2 研究方法

2.1 分区原则

金沙江下游地区的态系统功能分区遵循以下几个原则。首先,生态系统功能的分异原则。该区地处亚热带湿润地区,河流是非常重要的区域联系纽带,在本研究中特别强调和重视流域内与上游、中游间的相互关系,以及由于自然因素和人类活动的区域差异性,所导致的区域生态系统结构、功能和服务的差异。其次,主导生态功能一致性原则。分区重点考虑区域生态环境问题、生态环境敏感性、生态服务功能和结构,以及主导因子的生态学基础与依据。在各评价参数中,筛选出主导参数,并赋予相关权重,同时还考虑参数的相互影响与综合作用^[16]。第三,区域共扼原则。生态功能区域划分单元必须具有独特性,空间上完整的自然区域。即任何一个生态功能区必须是完整的个体,不存在彼此分离的部分。第四,生态-社会-经济可持续发展原则。

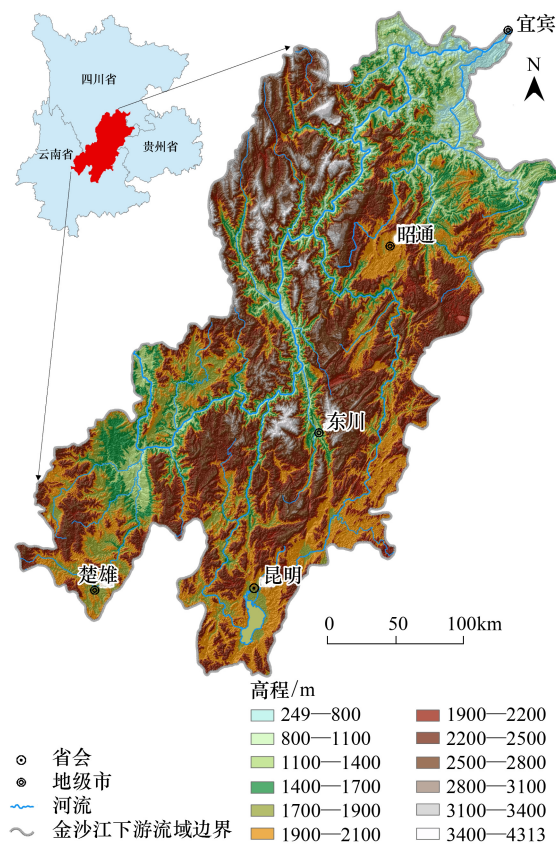


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

生态功能分区结合了社会经济发展水平,实现资源的合理开发利用,坚持生态、社会、经济效益相统一的原则^[17-18],促进区域社会的可持续发展。最后,前瞻性原则。生态功能分区的目的是保护具有重要生态服务功能的生态区。分区在充分把握生态系统结构与功能演变趋势的基础上,结合区域社会经济发展方向,高度重视区域未来社会经济发展导致的生态环境效应、生态服务功能的变化。

2.2 研究方法

基于 2000 年该地区的遥感影像、土地覆被数据和植被数据作为该地区功能分区的数据源,得到土地覆被类型、植被等数据;基于气候数据得到该地区的年降水量、年均温等气象指标数据;利用金沙江下游地区 1:25 万 DEM 数据及经济、社会数据,建立金沙江下游地区生态-社会-经济信息系统数据库。考虑到不同尺度生态分区结果的统一与分级管理的需要,金沙江下游地区生态功能分区应与大尺度生态分区结果相协调。基于中国生态系统与生态功能区划数据库的中国生态系统敏感性数据集和中国生态服务功能重要性数据集,提取了金沙江下游地区生态系统敏感性数据集和生态服务功能重要性数据集。

在选择众多生态因子中,各因子对经济发展和生态建设的影响程度不尽相同,因此,应当根据影响程度赋予不同的权值,影响大的因子赋予较大的权值,反之亦然^[19]。本研究采用等级层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 确定各因子的权重。AHP 是一种分析多因素、多准则、多目标、复杂大系统的定性与定量相结合的系统分析方法^[20]。具体方法包括两个步骤:1) 构造判断矩阵 邀请生态功能区划专家进行指标间两两重要性的判评,构建的判断矩阵 C 。矩阵 C 的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量为 W ,满足 $CW = \lambda_{\max} W$ 。特征向量 W 的分量就是各生态因子的权重。2) 一致性检验 衡量不一致程度的指标 (Consistency Index) 为 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, n 是矩阵的阶数。根据 n 查表得平均随机一致性指标 (Random Index, RI)。当 $CI/RI \leq 0.1$ 时,认为矩阵 C 的不一致性可以接受,即计算得出的权重值可靠;反之,则需要重新调整判断矩阵。

依据评价因子分级标准,计算出基于不同栅格的单因子评价结果,并在 GIS 的栅格加权叠加技术支持下,采用加权因子法对单因子评价结果进行叠加分析,计算公式为: $SC_i = \sum SD_{ki} W_k$ 。式中, i 为栅格编号, n 为评价因子总数, k 为评价因子编号, SC_i 为第 i 个栅格的综合评价值, SD_{ki} 为第 i 个栅格的第 k 个评价因子适宜度、敏感性或者生态系统服务功能重要性的评价值, W_k 为 k 因子对第 i 个栅格的权重。

2.2.1 生态适宜性评价

生态适宜度从生态学角度出发,根据各项土地利用的生态要求,分析区域土地开发利用的适宜性,确定区域开发的环境制约因素,从而寻求最佳的土地利用方式和合理的规划方案。它是土地利用规划的核心问题之一,是确定生态规划方案的基础。该分析方法应用一个综合评价的指数确定其规划方向的整体合理性^[21]。该研究选取了地形、气候、领域、土地覆被、地质地貌和土壤作为主要的因子,然后基于判断矩阵的权重系数来加权生成生态适宜性评价图。

2.2.2 生态环境敏感性评价

生态环境敏感性是指生态环境对人类活动反应的敏感程度,用来反映生态系统产生生态失衡与生态环境问题的可能性大小。可以以此确定生态环境影响最敏感的地区和最具有保护价值的地区,为生态功能分区提供依据^[6]。生态环境敏感性评价的内容,包括土壤侵蚀敏感性、石漠化敏感性、酸雨敏感性、沙漠化敏感性和盐渍化敏感性,通过这些指数的加权计算得到生态环境敏感性的空间分布特征。鉴于金沙江下游地区的地理分布特征,选取前三者。在评价中应利用遥感数据、地理信息系统技术及空间模拟等先进的方法与技术手段^[6]。土壤侵蚀敏感性以通用土壤侵蚀方程为基础,综合考虑降水、地貌、植被与土壤质地等因素,运用地理信息系统来评价土壤侵蚀敏感性及其空间分布特征。石漠化敏感性根据评价区域是否喀斯特地貌、土层厚度以及植被覆盖度等进行评价。酸雨敏感性根据区域的气候、土壤类型与母质、植被及土地利用方式等特征来综合评价区域的酸雨敏感性。另外,为了进一步细化流域尺度的生态环境敏感性评价,本研究收集了该地区更为精细的气候数据(多年均降水量和年均温度)、坡度、高程和土地覆被类型数据。同样利用这些因子的判

断矩阵所生成的特征向量,加权来分析金沙江下游地区的敏感性地区。

2.2.3 生态系统服务功能重要性评价

生态系统服务功能是指生态系统及其生态过程所形成的有利于人类生存与发展的生态环境条件与效用,例如森林生态系统的水源涵养、土壤保持、气候调节、环境净化功能等。生态服务功能重要性评价的内容包括生物多样性保护评价,水源涵养和水文调蓄、土壤保持评价,沙漠化控制,营养物质保持和海岸带防护功能评价等。评价方法主要参考了国务院西部地区领导小组办公室和国家环境保护总局 2002 年发布的《生态功能区暂行规程》,具体方法是对每一项生态服务功能按照其重要性划分出不同级别,明确其空间分布,然后在区域上进行综合。对于生态系统服务功能,目前针对自然生态系统开展了大量的研究^[22-23]。本研究选取的内容包括:1)水源涵养和水文调蓄,区域生态系统水源涵养的生态重要性在于整个区域对评价地区水资源的依赖程度及洪水调节作用;2)土壤保持,其在考虑土壤侵蚀敏感性的基础上,分析其可能造成的对下游河床和水资源的危害程度与范围;3)生物多样性保护,优先保护生态系统与物种保护的热点地区均可作为生物多样性保护具有重要作用的地区。利用这三方面的不同因子之间的两两对比生成判断矩阵,同时得到各因子之间的权重系数,最后生成生态系统服务功能重要性评价图。

2.2.4 生态功能分区

生态适宜度是生态功能分区的基础,它决定着各类规划在空间上的配置;生态环境敏感性是生态功能分区的重点,金沙江地区的生态环境非常脆弱,一点破坏所产生的后果非常严重,它将直接影响该地区的水电安全和人民生活;生态服务功能重要性是生态功能分区的核心,生态功能规划最终是想自然如何能够更好地为人类所利用,它也是长期可持续发展的关键所在。三者的叠加组合形成了生态功能分区的结果,因为三个过程中各自的独立评价是基于归一化的标准分值,同时三个过程对于生态功能分区的权重相对平行,所以三者赋予了相同的权重。

在各类指标评价分级时,采用 ArcGIS 空间分析功能中自然分类法(Natural break),该方法利用统计学 Jenk 最优化法得出分界点,能够使各级内部方差之和最小^[24]。本研究基于全国生态功能分区的基础数据,同时结合所获取更为精细的空间数据,包括气象数据、地形数据、领域数据、土壤数据等,进一步开展流域尺度生态功能评价和重要生态功能区的划分,旨在形成更为具体和切实的流域尺度的生态功能分区方案。

3 结果与讨论

3.1 生态适宜度评价

依据对土地覆被和土地利用影响的显著性及指标的相对独立性^[25-27],筛选评价因子,用 9、7、5、3、1 表示评价因子对金沙江下游地区生态适宜程度的高低,并采用 AHP 确定 12 个评价因子的各自权重(表 1),然后加权叠加,对综合适宜度叠加结果进行聚类,划分为 5 类生态适宜性区域:不可用地[2.9, 3.7]、不适用地(3.7, 4.2]、基本适宜用地(4.2, 5.3]、适宜用地(5.3, 5.8]和最适宜用地(5.8, 7.2](图 2)。

由生态适宜评价结果可以看出,最适宜用地主要分布于研究区南部地区的昆明及其周边地区,以及金沙江下游的宜宾地区,面积为 763.00 km²,占流域总面积的 7.18%;适宜用地主要分布于流域南部的安宁县、富民县、嵩明县、马龙县以及寻甸回族彝族自治县,另外在金沙江上游的会理县及其周边地区也有不少分布,其分布面积为 2126.55 km²,占流域总面积的 20.02%;基本适宜用地分布面积最大,主要位于流域的中部地区,面积为 6848.17 km²,占流域总面积的 64.47%;不适宜用地主要集中在昭通市、会泽县以及咸宁彝族回族苗族自治县的西部地区,另外在布拖县也有零散分布,其总面积为 836.97 km²,占流域总面积的 7.88%;不可用地主要分布于流域中偏北地区,咸宁彝族回族苗族自治县的西南地区,以及昭通市和鲁甸县的西部地区,面积为 47.31 km²,占流域总面积的 0.45%(图 2)。从各类适宜类型的空间分布来看,基本适宜用地占绝大部分,不适宜的类型主要是中部高山峡谷地区,最适宜类型主要是分布在金沙江下游和海拔相对较低的地区。这显示高程和地形是该地区生态适宜性的重要决定因素。

表 1 生态适宜性评价因子分级标准及权重

Table 1 Classification criteria and weights of ecological suitability evaluation factors

评价因子 Evaluated Factors		属性 Properties	评价价值 Evaluated Value	权重 Weight
地形条件 Topography	高程 Elevation	< 800	9	0.2226
		800—1500	7	
		1500—2500	5	
		2500—3500	3	
		>3500	1	
	坡度 Slope	<5%	9	0.0513
		5—10%	7	
		10—20%	5	
		20—45%	3	
		>45	1	
	坡向 Aspect	135—225	7	0.0276
		90—135, 225—270	5	
		45—90, 270—315	3	
		0—45, 315—365	1	
领域情况 Neighborhood	距离铁路距离 Distance to railway	> 160 km	9	0.0078
		120—160 km	7	
		60 —120 km	5	
		1—60 km	3	
		< 1 km	1	
	距离公路距离 Distance to road	> 100 km	9	0.0234
		50—100 km	7	
		15 —50 km	5	
		1—15 km	3	
		< 1 km	1	
气候条件 Climate	年降水 Annual Precipitation	>1150	9	0.2485
		1000—1150	7	
		850—1000	5	
		750—850	3	
		< 750	1	
	年均温度 Annual mean temperature	>18	9	0.0828
		15 —18	7	
		13 —15	5	
		11—13	3	
		< 11	1	
土地利用类型 Land use		湿地和水域	9	0.1037
		林地	7	
		草地、荒地和稀疏林地	5	
		耕地	3	
		建设用地	1	
地质地貌类型 Geology and geomorphology	地貌类型 Geological type	低海拔山地、低海拔台地、低海拔丘陵、低海拔低平原	9	0.0421
		中海拔台地、中海拔山地、中海拔平原	7	
		中高海拔山地、中高海拔平原、中高海拔梁崩	5	
		高海拔山地	3	
		现代冰川	1	
	地质灾害 Geological disaster	岩溶塌陷	7	0.1263
		弱或不发育期	5	
		泥石流	3	
		滑坡、崩塌	1	

续表			
评价因子 Evaluated Factors		属性 Properties	评价价值 Evaluated Value
土壤条件 Soil	土壤类型 Soil type	黑粘土(亚高山草甸土) 紫色土 南方水稻土、红壤、赤红壤 棕壤、黄壤、黄棕壤 石灰土	9 7 5 3 1
	土壤侵蚀 Soil erosion	11 微度 12 轻度 31 微度 13 中度 14 强度 15 极强度 16 剧烈	9 7 5 3 1
			0.0107
			0.0532

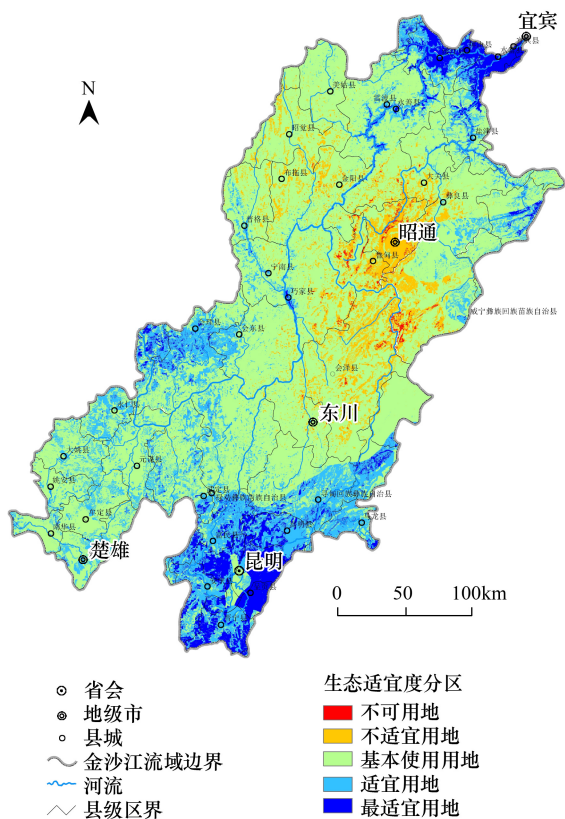


图 2 生态适宜度评价
Fig.2 Ecological suitability regionalization

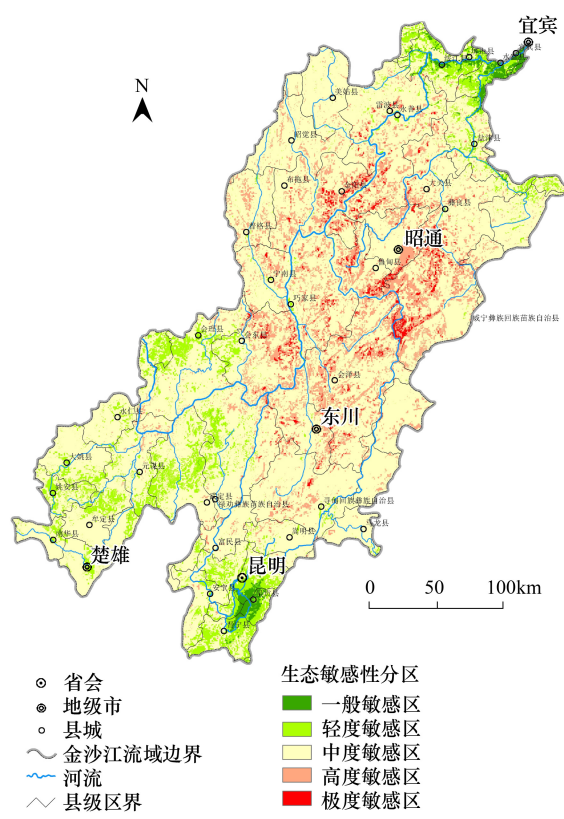


图 3 生态环境敏感性评价
Fig.3 Ecological environment sensitivity regionalization

3.2 生态环境敏感性评价

基于生态环境敏感性评价因子选取的研究^[28-30],同时兼顾金沙江下游地区生态环境实际情况和长期可持续发展,最终选取的因子和基于 AHP 法赋值的权重如表 2 所示。依据敏感度评价值分为五级:极敏感区(6.5, 7.4]、最敏感区(5.8,6.5]、敏感区(4.2, 5.8]、低敏感区(3.5, 4.2]和不敏感区(1.7, 3.5](图 3)。

生态环境敏感性评价显示,极度敏感区域主要分布于流域金阳县周边、以及咸宁彝族回族秒自治县和巧家县与会泽县的交界处,另外在会东县略有分布,其面积为 114.57 km²,占流域总面积的 1.41%;高度敏感区域主要分布于流域中北部相对较高海拔的地区,面积为 755.50 km²,占流域总面积的 9.29%;中度敏感区域广泛分布在金沙江下游的整个区域,分布范围最大,总面积达 6,156.63 km²,占流域总面积的 75.67%;轻度敏感区域主要位于流域的西南部、北部的绥江县、以及南部的安宁县和晋宁县等地,其面积为 1,004.94 km²,占流

域总面积的 12.35%;一般敏感区域主要分布于云南呈贡县的周,边以及四川的水富县和宜宾地区,其它地区则分布较少,其面积为 104.16 km²,占流域总面积的 1.28%。敏感性空间分析显示和生态适宜性空间分布的类似的格局,也就是说生态适宜性高地方所具有的生态敏感性也高,反之亦然。这两个方面的评价相互佐证了该生态功能分区方法的合理性。

表 2 生态敏感性评价因子分级标准及权重
Table 2 Classification criteria and weights of ecological sensitivity evaluation factors

评价因子 Evaluated factors	属性 Properties	评价值 Evaluated Value	权重 Weights
年降水量 Annual precipitation	< 750	9	0.2311
	750—850	7	
	850—1000	5	
	1000—1150	3	
	>1150	1	
年均温度 Annual mean temperature	< 11	9	0.0770
	11—13	7	
	13 —15	5	
	15 —18	3	
	>18	1	
坡度 Slope	>45	9	0.0514
	20—45%	7	
	10—20%	5	
	5—10%	3	
	<5%	1	
高程 Aspect	>3500	9	0.2568
	2500—3500	7	
	1500—2500	5	
	800—1500	3	
	< 800	1	
土地覆被类型 Land cover	裸岩砾石地、城镇用地、公交建设用地	9	0.0757
	旱地、水田、低覆盖草地	7	
	疏林地、中覆盖草地	5	
	有林地、高覆盖度草地、灌木林地	3	
	湖泊、水库-坑塘	1	
石漠化敏感性 Desertification sensitivity	极敏感区	9	0.0416
	高度敏感区	7	
	中度敏感区	5	
	轻度敏感区	3	
	一般敏感区	1	
土壤侵蚀敏感性 Soil erosion sensitivity	极敏感区	9	0.1800
	高度敏感区	7	
	中度敏感区	5	
	轻度敏感区	3	
	一般敏感区	1	
酸雨敏感性(土壤) Acid rain sensitivity	极敏感区	9	0.0865
	高度敏感区	7	
	中度敏感区	5	
	轻度敏感区	3	
	一般敏感区	1	

3.3 生态系统服务功能重要性评价

基于相关研究和金沙江下游地区的生态环境,选取了水源涵养、土壤保持、生物多样性维持和保护三个方面生态系统的服务功能来反映金沙江下游地区生态系统生产、生活和生态环境特征的评价因子(表 3),对不

同生态服务功能单元及价值大小进行评估,根据各生态系统服务功能价值,将金沙江下游地区生态服务功能分为 5 类:极重要区(6.0, 7.0]、高度重要区(5.1, 6.0]、中等重要区(2.6, 5.1]、轻度重要区(1.6, 2.6]和一般重要区[1.0, 1.6](图 4)。

表 3 生态系统服务功能评价因子分级标准及权重

Table 3 Classification criteria of weights of ecological service factors

评价因子 Evaluation factors	属性 Properties	评价价值 Evaluated values	权重 Weights
水源涵养功能重要性 Water source conservation	有林地、湖泊、水库、坑塘、高覆盖度草地	7	0.5842
	中覆盖草地、灌木林地	5	
	低覆盖草地、疏林地	3	
	裸岩砾石地、城镇用地、公交建设用地、旱地、水田	1	
土壤保持功能重要性 Soil conservation	极重要区	7	0.1350
	重要区	5	
	中等重要区	3	
	一般重要区	1	
生物多样性维持与保护功能重要性 Sustainability and protection of biodiversity	极重要区	7	0.2808
	重要区	5	
	中等重要区	3	
	一般重要区	1	

由生态系统服务功能重要性评价可以看出,极重要区域主要雷波县和禄劝彝族苗族自治县的高海拔地区,其它地区也有零星分布,总面积为 440.95 km²,占流域总面积的 4.13%;高度重要区域主要位于美姑县的北部、昭通市的西部、会东县、以及禄劝彝族苗族自治县的低海拔地区,总面积为 1,639.81 km²,占流域总面积的 15.35%;中等重要区域广泛分布于整个流域的大部分地区,面积最大,达 6,229.07 km²,占流域总面积的 58.31%;轻度重要区域集中的分布主要有流域的南北部,中部地区也有许多零散的分布,面积为 1,302.83 km²,占流域总面积的 12.20%;一般重要区域集中的分布主要有鲁甸县的东部、姚安县、牟定县、南华县,以及云南的呈贡县、晋宁县和嵩明县等地,另外在布拖县和昭觉县也有零星分布,面积为 1,069.20 km²,占流域总面积的 10.01%。生态系统服务功能重要性的空间格局和前两者并不相同,最重要的区域分布在下游的高山地区,另外在流域内其它高海拔地区也有一些零散的分布,这就说明金沙江高海拔地区的生态系统服务功能的重要性要比低海拔地区的重要。

3.4 生态功能分区

3.4.1 金沙江下游地区生态功能分区方案

主要参照《全国生态功能区划》^[7],采用空间叠置

法、相关分析法以及专家集成,在其一级和二级划分基础之上,根据该地区的实际调查特征,三级略加调整,同时将金沙江下游地区生态适宜性、生态环境敏感性、生态系统服务价值重要性的评价图,按生态功能区划的等级体系,通过自上而下划分方法进行重要生态功能区的划分。基础的三级分区结果显示:金沙江下游地区生

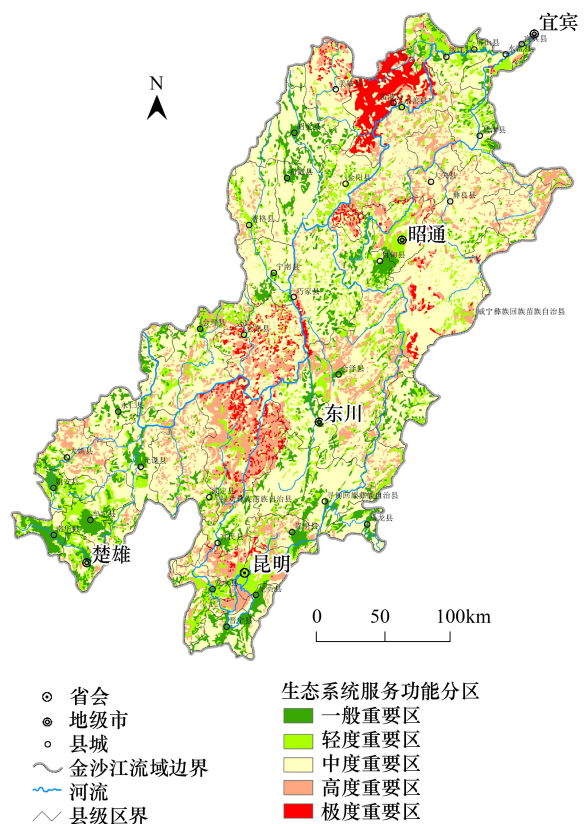


图 4 生态系统服务功能重要性分区

Fig.4 Ecoregion delineation on importance of ecosystem services

态功能区划可划分为 2 个生态区、6 个生态亚区(图 5) 和 19 个生态功能区(图 6)。I. 四川盆地农林复合生态区包括 2 个亚区:盆中丘陵农林复合生态亚区(I-1)和四川盆地南缘岩溶常绿-落叶阔叶林生态亚区(I-2);前者的突出问题是森林覆盖率比较低,水土流失非常严重,后者是土地利用不合理,造成土地退化和环境一定程度的恶化,这两个亚区应当以土壤保持为主要恢复措施;II. 川西南-滇中北山地常绿阔叶林生态区包括 4 个亚区:山地偏干性常绿阔叶林生态亚区(II-1)、山地云南松林-羊草草甸生态亚区(II-2)、常绿灌丛-稀树草原生态亚区(II-3)、滇青冈-元江栲林-云南松林生态亚区(II-4)。这四个亚区根据分布的空间和地理特征,兼具水源涵养、生物多样性保护和土壤保持的生态保护的主要功能。三级生态功能区 29 个包括:城市污染控制生态功能区、四川盆地水土保持区、四川盆地农林复合生态农业区、四川盆地农林复合生态农业区、四川盆地土壤保持生态功能区、川西南山地生物多样性保护生态功能区、川西南山地城镇-农业生态功能区、川西南山地土壤保持生态功能区、乌蒙山林草生态农业区、乌蒙山林草水源涵养与生态农业区、乌蒙山湿地生物多样性保护生态功能区、乌蒙山林草矿业污染控制生态功能区、乌蒙山林草林草土壤保持生态功能区、乌蒙山林草城镇-农牧区生态功能区、乌蒙山林草高山峡谷水土保持区、干热河谷水源涵养与生态农业区、干热河谷生态脆弱区、干热河谷水土保持区、干热河谷生态脆弱区、干热河谷土壤保持生态功能区、高原盆谷水源涵养与生态农业建设区、高原盆谷水土保持区、高原盆谷生态农业区、高原盆谷生态农业区、高原盆谷生态脆弱区、高原盆谷水土保持区、高原盆谷水土流失综合整治区、高原盆谷水源涵养区、高原盆谷生态农业区(表 4)。本研究中,一和二级分区主要是基于《全国生态功能区划》,一级是基于大的生态类型进行的划分,分为农林复合和林区两大类;二级分类反应出各区不同的突出问题,如森林覆盖率,水土流失,土地利用和土地退化,一级环境恶化等问题,这两级和全国规划一致。三级分类和国家规划略有差别,主要根据水源涵养、生物多样性保护和土壤保持的生态保护的主要功能分布进行划分。与国家不同的是将类似生态功能区域进行适当归类,形成一个较为统一的不同生态功能的三级分类区。

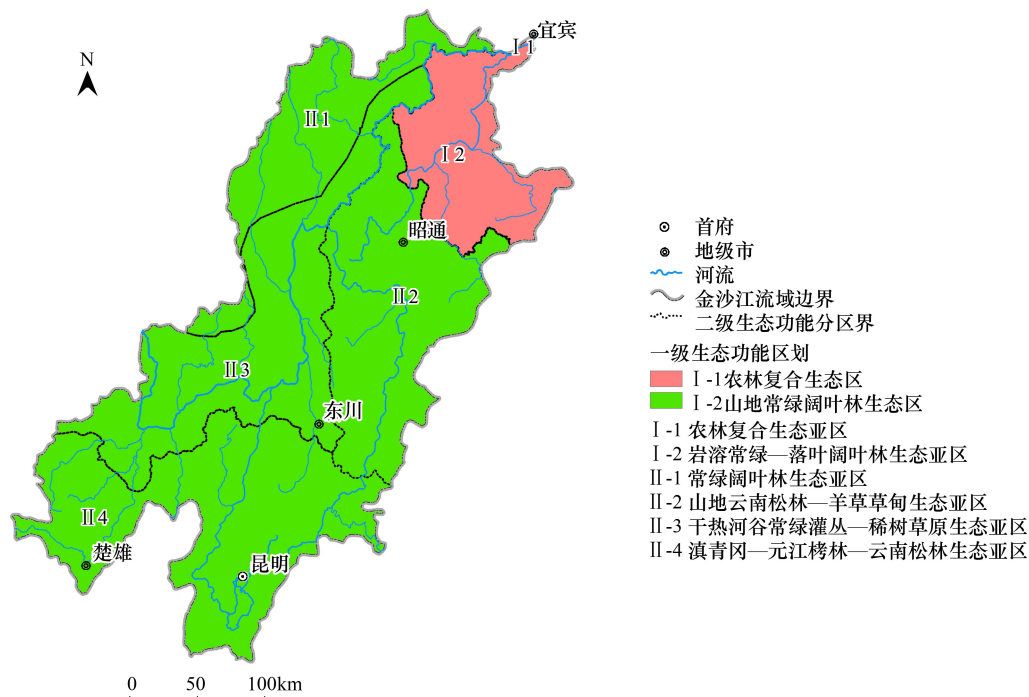


图 5 金沙江下游地区生态功能一级、二级区划

Fig.5 First & second orders of ecological function regionalization in the downstream of Jinsha River

该地区生态功功能分区显示,该地区的主要问题有以下几方面:①人口密集,土地开垦严重,农业结构不合理,造成了大面积的土地退化和水土流失;②森林覆盖率低,滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害严重;③面源污

染和工农业污染较重。针对以上问题,提出以下几条保护建议:①以水土保持为目标,调整农业种植结构,改善耕作条件和管理方式,保护农田生态环境;②封山育林,增减森林面积,对于一些地区适当进行生态移民。③严格控制工业的对于土地的污染,发展第三产业增加当地居民的其它经济收入渠道。

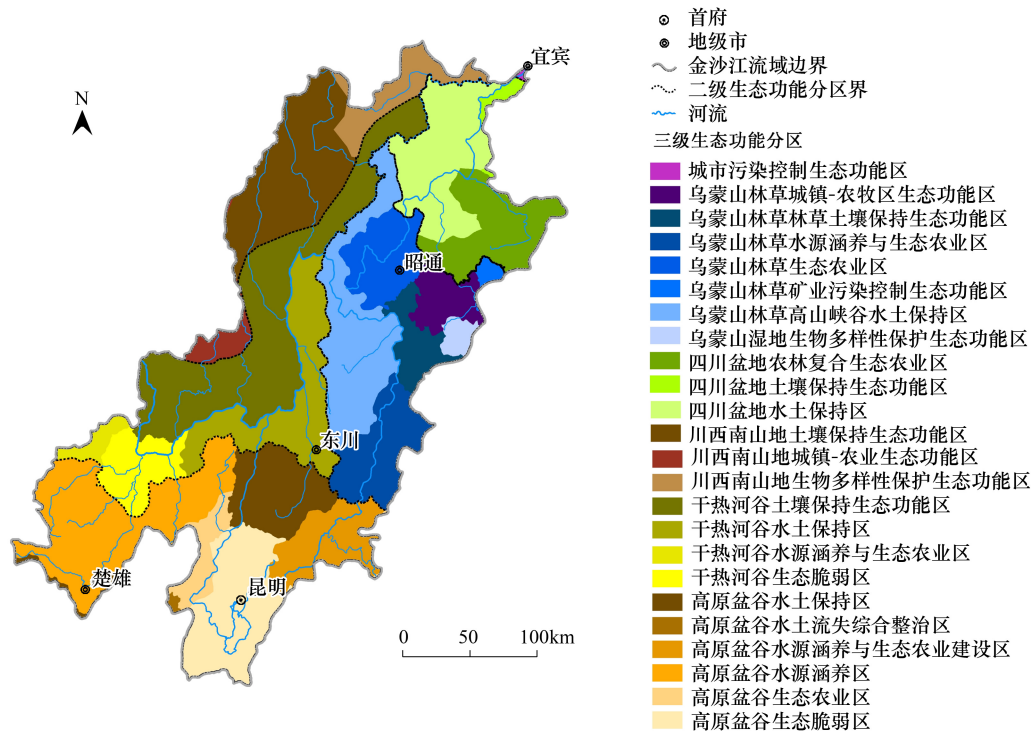


图 6 金沙江下游地区三级生态功能区划

Fig.6 Third order of ecological function regionalization in the downstream of Jinsha River

表 4 金沙江下游地区三级生态分区表

Table 4 The First, second and third orders of ecological function regionalization in the LJRB

生态区 Ecotope	生态亚区 Sub-ecotope	生态功能区 Ecological function regionalization
I 四川盆地农林复合生态区 I Agroforestry ecotope in Sichuan basin	盆中丘陵农林复合生态亚区(I-1)	城市污染控制生态功能区
	Hilly agroforestry sub-ecotope in central Sichuan basin (I-1)	
	四川盆地南缘岩溶常绿-落叶阔叶林生态亚区(I-2)	四川盆地水土保持区
	Karst broadleaved deciduous forest sub-ecotope in south edge of Sichuan basin (I-2)	四川盆地农林复合生态农业区 四川盆地农林复合生态农业区 四川盆地水土保持生态功能区
II 川西南-滇中北山地常绿阔叶林生态区 II Mountain broadleaved deciduous forest ecotope in the southwest Sichuan and central Yunnan	川西南山地偏干性常绿阔叶林生态亚区(II-1)	
	川西南山地生物多样性保护生态功能区	
	Mountain arid evergreen hardwood forest sub-ecotope in the southwest Sichuan (II-1)	川西南山地城镇-农业生态功能区 川西南山地水土保持生态功能区
	乌蒙山山地云南松林-羊草草甸生态亚区(II-2)	乌蒙山林草生态农业区
	Wumengshan mountain pine-chinensis meadow sub-ecotope in Yunnan (II-2)	乌蒙山林草水源涵养与生态农业区 乌蒙山湿地生物多样性保护生态功能区 乌蒙山林草矿业污染控制生态功能区 乌蒙山林草林草土壤保持生态功能区 乌蒙山林草城镇-农牧区生态功能区 乌蒙山林草高山峡谷水土保持区
	金沙江下游干热河谷常绿灌丛-稀树草原生态亚区(II-3)	干热河谷水源涵养与生态农业区

续表

生态区 Ecotope	生态亚区 Sub-ecotope	生态功能区 Ecological function regionalization
	Dry-hot valley evergreen bushes-savanna in the lower Jinsha River Basin (II -3)	干热河谷生态脆弱区 干热河谷水土保持区 干热河谷生态脆弱区 干热河谷土壤保持生态功能区
	滇中高原盆谷滇青冈-元江栲林-云南松林生态亚区(II-4) Cyclobalanopsis-Castanopsis-pine forest sub-ecotope of basin valley on plateau in the central Yunnan (II -4)	高原盆谷水源涵养与生态农业建设区 高原盆谷水土保持区 高原盆谷生态农业区 高原盆谷生态农业区 高原盆谷生态脆弱区 高原盆谷水土保持区 高原盆谷水土流失综合整治区 高原盆谷水源涵养区 高原盆谷生态农业区

3.4.2 金沙江下游地区重要生态功能区

金沙江下游地区重要生态功能分区不同于生态系统服务功能重要性评价,二者的区别在于后者是评价,主要是基于生态系统服务功能进行评价,针对区域典型生态系统,评价生态系统服务功能的综合特征。而前者是分区,生态系统服务功能的重要性只是重要生态功能区划分中的其中一项内容,该分区同时兼顾和综合了生态适宜评价和生态环境敏感性评价的内容,分析生态服务功能的区域分异规律,明确生态系统服务功能的重要区域。金沙江下游地区重要生态功能区是以以水源涵养、水土保持和生物多样性保护 3 类具有明显流域特征的主导生态功能为依据,结合生态适宜性、生态环境敏感性以及生态系统服务功能重要性评价的评分值,分析生态系统评价和区划结果,辨识和划分金沙江下游生态系统服务功能的重要区域(图 7),共确定出 19 个对区域生态安全具有显著意义的生态系统服务功能重要区域。其中,水源涵养重要区 13 个,面积 11,403 km²,占金沙江下游地区总面积的 13.15%;水土保持重要区 5 个,面积 10,733 km²,占金沙江下游地区总面积的 12.38%;生物多样性重要区 1 个,面积 2,710 km²,占金沙江下游地区总面积的 3.13%。水源涵养区主要为河流

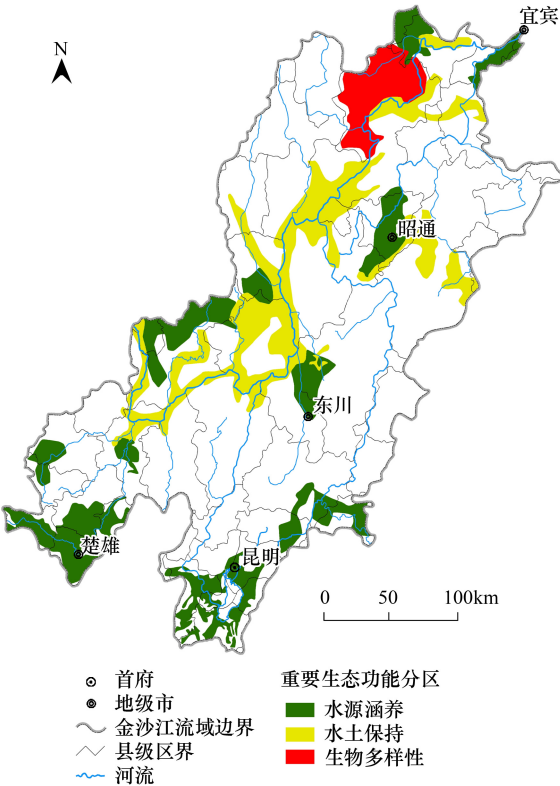


图 7 金沙江下游地区重要生态功能分区

Fig.7 Important ecological function regionalization in the LJRB

源头及重要水源涵养林,这些地区生态敏感性最强,很容易受到外来干扰的影响,或具有最重要的生态服务功能,需要重点保护。水土保持重要区生态敏感性强,对外来的干扰抵抗力弱,或对金沙江下游地区的发展具有生态屏障功能。生物多样性保护区物种丰富,对于该地区物种资源的保护和可持续发展具有重要作用。

AHP 是一种对于多因素,多标准的综合评价方法,它可以将定性和定量相结合来分析和解决问题,是一种有效的系统分析方法。可以将专家的主观判断与经验导入模型,并加以量化处理。许多案例利用 APH 进行了生态功能分区,其局限性主要在于一致性问题 and 标度问题,所以利用该方法如果未来能和其它专家判断

方法相结合,以解决在确定各因子属性权重时,专家主观偏好问题,从而提供判断的精度。国家环境保护部 2014 年发布的《生态功能分区技术规范》(征求意见稿)指出,生态环境敏感性和生态系统服务功能重要性是生态功能分区的两项内容。另外,许多案例研究中也应用这两方面的内容进行生态功能分区的研究。从这些规范和研究实例中,可以看出,为了满足宏观指导与分级管理的需要,必须对自然区域开展分级区划。第一级主要是从大的自然气候和地理特点进行自然生态区的划分;第二级根据生态系统类型与生态系统服务功能类型进行生态亚区的划分。第三级分区主要是基于生态环境敏感性和生态系统服务功能重要性进行的划分。本研究中三级生态功能区的划分也主要是参看这些内容进行开展的,另外,重要生态功能区的划分是基于这样思想指导下进行的分区,不仅考虑了生态服务功能重要性和生态环境敏感性,同时加入生态适宜性评价的内容,进行了重要生态功能区的划分。所以采用生态功能分区方案以及重要生态功能区的划分,具有一定合理和科学性。

4 结论

本研究明确了金沙江下游地区生态系统空间分布特征,以及生态敏感性区域和生态功能区域的空间分异规律。金沙江下游地区可划分为 2 个生态区、6 个生态亚区和 29 个生态功能区。对于指导金沙江下游地区自然资源的有序开发利用和产业合理布局具有重要意义。划分重要生态功能区对于实施流域生态环境保护和资源合理利用具有重要意义^[31]。在大多数情况下,生态系统的保护是以协调人类发展需求与自然环境可持续发展为基础,但是,生态环境的保护首先针对主要生态环境问题和优先保护对象进行生态系统的保护。为了更好地协调金沙江下游地区生态系统保护与社会经济发展的关系,选取了 19 个重要生态功能区域,将解决问题的焦点从流域尺度缩小到了重要的关键区域,对于地方生态功能重点保护区域的建立具有重要指导意义。将有助于提出流域实际可行的规划方案,也将为该地区制定有效的管理措施提供参考,也将为该地区四大水电站的建设提供生态安全的保障。

在充分贯彻了流域生态功能区划方法和原则的前提下,基于 GIS 空间分析的区域聚类方法,建立生态系统的层次结构,然后基于层次分析的方法确定了生态功能分区的方案。在划分生态功能区的过程中,虽然气候、植被、坡度、土壤等在形成生态功能空间类型中有着主导作用,但是在实际生态功能分区中,如何确定最具代表性的参数组合仍十分困难。研究区边界以及各类区界的划分是固定的,而在实际自然环境中,通常为过渡边界,即生态交错区^[32-33]。采用 GIS 空间分析的优点是制图过程量化、自动化,以及变量灵活增删、更新和重新组合;也可以结合遥感数据,进行生态环境的实时监控。但是变量的选择、变量重要性对比分值、研究区的环境特性数据的代表性都需要专家知识的辨识。另外,该结果可用于金沙江下游地区水环境管理、水资源保护、生态修复和生态系统可持续性保护。但是,如何协调金沙江下游地区生态环境保护与社会经济发展,是管理者、利益相关者和专家学者面临的巨大挑战,尚需深入研究。

参考文献(References):

- [1] Wright R G, Murray M P, Merrill T. Ecoregions as a level of ecological analysis. *Biological Conservation*, 1998, 86(2): 207-213.
- [2] Davis W S, Simon T P. *Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making*. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- [3] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 肖赓, 肖荣波, 郑华. 安徽省生态功能区划研究. *生态学报*, 2005, 25(2): 254-260.
- [4] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. *生态学报*, 1999, 19(5): 591-595.
- [5] Bailey R G. *Ecoregions of the United States*. Ogden Utah: USDA Forest Service, 1976.
- [6] 国务院西部地区领导小组办公室, 国家环境保护总局. 生态功能区划暂行规程, 2002.
- [7] 中国科学院, 国家环境保护总局. 全国生态功能区划, 2008.
- [8] 欧阳志云, 郑华, 黄宝荣, 高吉喜. 区域生态环境质量评价与生态功能区划. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [9] 燕乃玲. 生态功能区划与生态系统管理: 理论与实证. 上海: 上海社会科学院出版社, 2007.
- [10] 白杨, 郑华, 欧阳志云, 徐卫华, 江波, 方瑜. 海河流域生态功能区划. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2377-2382.

- [11] 陈利顶, 孙然好, 汲玉河. 海河流域水生态功能分区研究. 北京: 科学出版社, 2013.
- [12] 刘素平. 辽河流域三级水生态功能分区研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2011.
- [13] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生态功能分区. 地理研究, 2010, 29(1): 111-117.
- [14] 刘刚, 沈镭, 孙尚志, 张菲菲. 金沙江下游梯级电站开发影响区域的资源开发与产业可持续发展. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5): 565-570.
- [15] 周小娟, 张嫣, 祝莉玲. 金沙江下游生态环境遥感监测及 GIS 系统建设. 资源环境与工程, 2011, 25(2): 148-151.
- [16] Zhou Y C, Narumalani S, Waltman W J, Waltman S W, Palecki M A. A GIS-based spatial pattern analysis model for eco-region mapping and characterization. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17(5): 445-462.
- [17] Bertinelli L, Black D. Urbanization and growth. *Journal of Urban Economics*, 2004, 56(1): 80-96.
- [18] Olsson P, Folke C, Berkes F. Adaptive comanagement for building resilience in social-ecological systems. *Environmental Management*, 2004, 34(1): 75-90.
- [19] 岳东霞, 李文龙, 李自珍. 甘南高寒湿地草地放牧系统管理的 AHP 决策分析及生态恢复对策. 西北植物学报, 2004, 24(2): 248-253.
- [20] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [21] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.
- [22] 高中贵, 李升峰, 彭补拙. 工业园生态型土地功能区构建探讨——以常熟市国际工业园为例. 长江流域资源与环境, 2001, 10(6): 523-529.
- [23] County T, Plan L U. Land Suitability Analysis. Ravalli County, Montana, USA, 2008.
- [24] Steiner F, McSherry L, Cohen J. Land suitability analysis for the upper Gila River watershed. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50(4): 199-214.
- [25] Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [26] Koutsias N, Karteris M. Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complexes in a Mediterranean test site using satellite remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(15): 3093-3104.
- [27] Rossi P, Pecci A, Amadio V, Rossi O, Soliani L. Coupling indicators of ecological value and ecological sensitivity with indicators of demographic pressure in the demarcation of new areas to be protected: The case of the Oltrepò Pavese and the Ligurian-Emilian Apennine area (Italy). *Landscape and Urban Planning*, 2008, 85(1): 12-26.
- [28] Bergengren J C, Waliser D E, Yung Y L. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*, 2011, 107(3/4): 433-457.
- [29] Bailey R G. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management*, 1983, 7(4): 365-373.
- [30] Bydekerke L, Van Ranst E, Vanmechelen L, Groenemans R. Land suitability assessment for cherimoya in southern Ecuador using expert knowledge and GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, 69(2): 89-98.
- [31] Wallace K J. Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [32] Bailey R G. Identifying ecoregion boundaries. *Environmental Management*, 2004, 34(Suppl 1): S14-S26.
- [33] Attrill M J, Rundle S D. Ecotone or ecocline: ecological boundaries in estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(6): 929-936.