

顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例*

余珮珩¹, 冯明雪¹, 刘斌², 白少云^{2**}, 顾世祥², 陈奕云^{1,3,4**}

(1: 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

(2: 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

(3: 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

(4: 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 生态保护红线划定是保障国土空间生态安全的重要举措, 对保持生态系统的完整性, 实现可持续发展具有重要意义。本文基于生态系统服务功能和生态敏感性对杞麓湖流域进行生态安全格局体系的构建, 并开展精细化的生态保护红线划定研究, 并进一步结合无人机航拍影像及实地调研成果, 构建管控路径。得到结论: (1) 水源涵养、水土保持、生物多样性、洪水调蓄重要性评价中的极重要区域叠加得到生态系统服务功能极重要区。者湾河、长沙河、大沙河及沟谷密度较大的山区敏感性最高, 坝区整体生态敏感性较高。(2) 一级生态保护红线范围包括生态极重要区域、生态极敏感区域及湖泊岸线、水库。二级生态保护红线范围包括环湖生态缓冲区、山区林地生态缓冲区及以河流为主的生态廊道。三级生态保护红线范围为生态协调区, 土地覆盖以农田为主。(3) 一级生态保护红线范围内的生态极敏感区应采取相关生态修复技术进行生态功能的保护。二级生态保护红线范围以生态保护为重点, 保持该区域的生态环境质量。三级生态保护红线范围通过生态修复进行整体优化, 提高生态环境承载能力。

关键词: 生态保护红线划定; 生态保护红线管控; 生态安全格局; 国土空间规划; 杞麓湖流域

Demarcation and administration of watershed ecological protection red line considering the ecological security pattern—A case of the Qilu Lake watershed, Yunnan Province*

YU Peiheng¹, FENG Mingxue¹, LIU Bin², BAI Shaoyun^{2**}, GU Shixiang² & CHEN Yiyun^{1,3,4**}

(1: School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, P.R.China)

(2: Yunnan Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Kunming 650021, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 210008, P.R.China)

(4: Key Laboratory for National Geography State Monitoring (National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation), Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: Demarcation of ecological protection red line is an important measure to ensure the ecological security. It is conducive to maintain the integrity of the ecosystem and achieving the sustainable development. Based on the ecosystem function and ecological sensitivity, an ecological security pattern was constructed for Qilu Lake watershed. This paper demarcates and administers the ecological protection red line. We revealed that: (1) The extremely important regions of sub-elements are superimposed to obtain the extremely important regions of ecosystem function. Zhewan River, Changsha River, Dasha River and mountainous areas have the highest ecological sensitivity, the dam area has higher ecological sensitivity. (2) The red line of first-level ecological protection covers areas of extremely important and sensitive ecology, lake shorelines and reservoirs. The red line of secondary ecological protection covers the ecological buffer zone around the lake, the ecological buffer zone in mountainous areas and the ecological corridor

* 2019-06-10 收稿; 2019-08-23 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41771440)、国家高分辨率对地观测系统重大科技专项(89-Y40-G19-9001-18/20-03)、云南省院士工作站建设专项(2015IC013)和云南省创新团队建设专项(2018HC024)联合资助。

** 通信作者; E-mail: baishaoyun_cn@sina.com; chenyy@whu.edu.cn.

dominated by rivers. The three-level ecological protection red line covers the ecological coordination area, mainly farmland. (3) Ecological restoration should be adopted to protect the ecological functions of the extremely sensitive areas within the red line of first-level ecological protection. The red line for secondary ecological protection focuses on ecological protection to maintain the ecological quality of the region. Overall optimization of the three-level ecological protection red line should be carried out to improve the carrying capacity of the ecological environment.

Keywords: Demarcation of ecological protection red line; administration of ecological protection red line; ecological security pattern; national spatial planning; Qilu Lake watershed

生态保护红线是在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线,也是国土空间规划体系的重要组成和国土空间管控的重要依据^[1]。划定生态保护红线的目的在于建立最为严格的生态保护制度,对生态功能保障、环境质量和自然资源利用方面提出更高的监管要求。2017年2月,中华人民共和国生态环境部颁发的《生态保护红线划定指南》明确提出生态保护红线在遏制生态环境退化态势,优化国家生态安全格局,加速生态文明建设进程等方面均具有重要意义。2019年5月,《中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》发布,明确坚持底线思维,以国土空间规划为依据,把城镇、农业、生态空间和生态保护红线、永久基本农田保护红线、城镇开发边界作为调整经济结构、规划产业发展、推进城镇化不可逾越的红线。

生态保护红线的概念内涵经历了不断演化的过程,已经由生态管控体系上升为国家战略^[2]。广义的生态保护红线包括资源利用、环境质量、生态功能3种红线,狭义的生态保护红线是与资源利用红线、环境质量红线平行的生态功能保障红线。生态保护红线具有尺度特征、层级特征和空间耦合性三重属性^[3]。不同尺度(宏观、微观)的生态保护红线在侧重点、作用和精度上有所不同。空间型生态保护红线应该实施分级管控。不同领域和要素的生态保护红线区要落实到具体的区域和地块,分门别类地进行管理和引导,生态保护红线逐渐与环境资源承载力和环境质量结合起来,从整体数量的控制转向空间引导。

关于生态保护红线,国外的生态系统服务、保护地和生态网络等概念与我国的生态保护红线的思想贯通。保护地体系这一生态保护系统在国际上得到广泛的认可,保护地体系与生态保护红线所保护的内容具有一定相通性,其研究集中在生态保护区域的划定、生态保护效果的评价及生态保护网络的构建3方面^[4-6]。目前中国生态保护红线的研究和划定工作尚处于起步阶段^[7],生态保护红线的划定方法主要有3方面。一是通过构建适宜性和生态安全格局评价指标体系进行划定,涉及生态敏感性评价、生态系统服务功能重要性评价、生态灾害危险评价等方面^[8-12];二是在进行适宜性评价体系的基础上结合景观生态学相关理论,基于生态的几何形状、景观破碎度和连通度来判断生态环境的健康性与稳定性,从而进行生态保护红线的划定^[13-14];三是采用智能算法进行生态保护红线的划定,如离散粒子群、多智能体、元胞自动机、贝叶斯网络、布尔运算法等^[15-17]。现有研究大多以城市生态保护红线的划定为主,海洋、草原、河流及湖泊的研究工作较少;其次适宜性评价缺乏一致的综合指标体系和评价模型,划分方法简单粗放、对景观和区域尺度上的空间过程和联系考虑不足^[18],缺乏对结构性生态空间的识别^[13, 19];另外,由于缺乏协调、监测薄弱和执行不力,难以取得生态保护红线划定的实质性进展^[20]。

2018年6月,《云南省人民政府关于发布云南省生态保护红线的通知》提出云南省生态保护红线在宏观上呈“三屏两带”的基本格局,包含生物多样性维护、水源涵养、水土保持3大红线类型,共11个分区。然而,在当前全面开展国土空间规划工作的背景下,如何结合生态系统服务功能评估及生态敏感性评价,在流域这一微观尺度上开展生态保护红线划定及管控研究已成为当前国土空间规划研究的前沿热点。为了克服管理冲突,保障生态系统服务安全,新的生态红线政策(ecological redline policy, ERP)已经将生态系统服务作为实现目标的一种方式^[21-22]。

本文选取杞麓湖流域作为研究区,基于生态系统服务功能和生态敏感性对杞麓湖流域进行生态安全格局体系的构建,在此基础上开展精细化的生态保护红线划定研究,并进一步结合无人机航拍影像及实地调研成果来构建管控路径,为可持续发展预留空间,为湖长制工作提供技术依据。

1 研究区概况

如图1a所示,杞麓湖流域位于云南省玉溪市通海县境内,近似为一个封闭形的西东向平行四边形,中

部为封闭性的新月形断陷高原浅水湖泊——杞麓湖,湖周为平坝区,主要分布在湖泊的南、西、北面,坝区外围为中、低山。杞麓湖流域有红旗河、秀山沟、大新河、十里沙沟、二街沙沟、姜家冲沟等 14 条季节性河流。杞麓湖流域辖秀山街道、九龙街道、河西镇、四街镇、杨广镇、纳古镇及兴蒙乡,共计 6 镇(街道)1 乡,其中包括 53 个村委会,284 个自然村。2014 年 12 月,国家林业局批准杞麓湖为“国家湿地公园(试点)”建设。依据《云南通海杞麓湖国家湿地公园总体规划》,国家湿地公园规划总面积 3881.22 hm^2 ,湿地面积 3762.57 hm^2 ,工程建设预计总投资 1.87 亿元,截止 2018 年已完成投资 1.13 亿元。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

本文的研究数据包含了遥感影像、DEM 等空间数据和水文、气象、土壤、社会经济等统计数据。其中 DEM 数据来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m;遥感影像来源于遥感集市的高分一号数据,分辨率为 16 m,包括 2017 年 4 月 11 日、2017 年 7 月 14 日两期;水文气象数据包括气温、相对湿度、降雨量,来源于中国气象科学数据共享服务网,时间范围为 1981—2010 年;土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心;社会经济数据来源于政府网站和统计年鉴。随后对数据进行预处理,包括空间数据整合、数据插值及统计数据空间化等,获取流域 30 m 的土地、降雨、温度等栅格数据。结合研究区情况和土地利用现状分类(GB/T 21010—2017),将土地利用分为耕地、林地、灌木林地、未造林、园林、草地、水体、沼泽地、建设用地、其他用地 10 类(图 1b)。

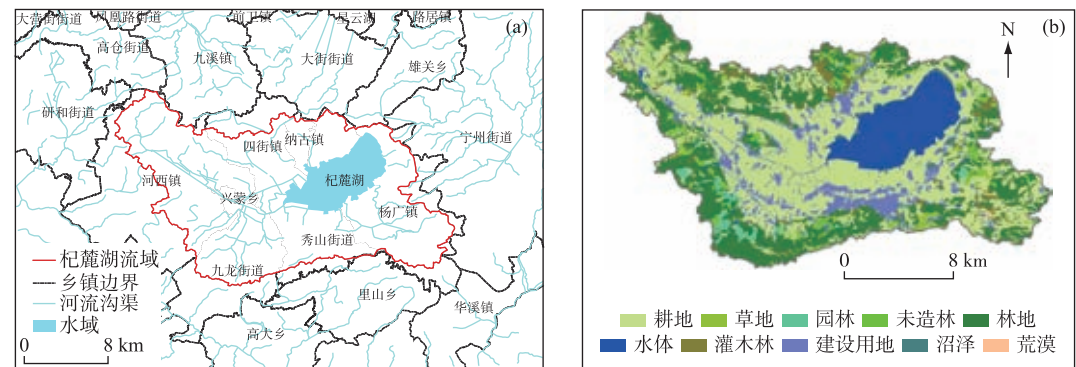


图 1 杞麓湖流域区位(a)及土地利用类型分类(b)

Fig.1 Location of Qilu Lake watershed (a) and land use type classification (b)

2.2 研究方法

2.2.1 生态保护红线评价指标体系的构建 《生态红线划定指南》中明确:“生态功能保障红线一般是指具有重要水源涵养功能、生物多样性维护功能、水土保持功能、维持海岸生态稳定、防风固沙功能等生态功能极重要区域,以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境极敏感脆弱区域。”因此研究遵循客观性、有效性、完整性、科学性、层次性、全面性、代表性及可获得原则,将生态服务功能重要性、生态敏感性作为基础,建立适用于研究区的生态保护红线评价指标体系(表 1)。

2.2.2 InVEST 模型 美国斯坦福大学、世界自然基金和大自然保护协会开发了 InVEST 模型,该模型旨在通过模拟不同土地覆被情景下生态系统服务质量和价值量的变化,实现生态系统服务功能价值定量评估的空间化。InVEST 模型提供了水源涵养、水土保持和生物多样性重要性评价等模块。

1)水源涵养重要性评价:水源涵养重要性评价以产水量为基准,采用 InVEST 模型水源供给模块中的产水量进行计算,其中产水量高的地区水源涵养能力低,反之则高。潜在蒸散量采用 Modified-Hargreaves 公式,土壤有效含水量采用基于土壤质地提出的非线性拟合土壤有效含水量的估算模型^[23],土壤的最大根系埋藏深度基于中国土壤数据库所提供的土壤厚度,根系深度参考 FAO56 导引推荐的标准作物系数^[24],以不同土地利用类型为单元得到根系深度。公式为:

表 1 生态保护红线评价指标体系
Tab.1 Ecological protection red line evaluation index system

目标层	准则层	要素层	指标层
生态评价指标	生态服务功能重要性	水源涵养功能重要性	潜在蒸散量
			土地覆盖
			根系深度
			土壤有效含水量
			土壤深度
			蒸散系数
			土壤可蚀性
	水土保持功能重要性	水土保持功能重要性	降雨侵蚀力
			地表植被覆盖度
			地形因子
			土地覆盖
			威胁因子
			对威胁的敏感性
			蓄水能力
	生态敏感性	洪水调蓄重要性	土地利用现状
		水土流失敏感性	沟谷密度
			土壤可蚀性
			地形坡度

$$Y_{xy} = \left(1 - \frac{AET_{xy}}{P_x}\right) P_x \tag{1}$$

式中, Y_{xy} 为景观类型 y 的栅格单元 x 的年降水量, AET_{xy} 为景观类型 y 中的栅格单元 x 的年实际蒸散量, P_x 为栅格单元 x 的年降雨量.

2) 水土保持重要性评价: 以水土保持量, 即潜在与实际土壤侵蚀量的差值作为水土保持功能的评估指标. 模型采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 评估流域基本测算单元的土壤侵蚀风险. 降雨侵蚀力选用通过人工模拟降雨手段建立的月降雨侵蚀力模型^[25-26]; 土壤可蚀性因子采用修正的土壤可蚀性模型; 地形因素反映了坡长与坡度对土壤侵蚀的影响, 坡长和坡度的计算应用改进的坡长和坡度因子算法^[27-29]; 基于高分遥感影像提取的流域 NDVI, 进而利用 ENVI 软件提取植被覆盖率, 通过归一化获取. 公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S(1 - C) \tag{2}$$

式中, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可侵蚀因子, L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为植被覆盖因子.

3) 生物多样性重要性评价: 生物多样性评价以区域生境质量的高低作为评估指标, 运用 InVEST 模型的生境分析模块进行评价. 生境质量的高低与生态适宜性呈正比. 威胁因子包括人为和自然因素, 由于研究区域人口密集, 乡镇居民点众多, 且影响因子对生境质量的影响主要依托于建设、农用地等因素, 因此选取建设用地、耕地为生境质量的威胁因子; 不同生境类型对威胁因子的敏感性因子参数赋值遵循自然生境类型 > 半人工生境类型 > 人工生境类型的原则^[30-31], 结合流域生态环境的实际情况得到各生境类型对威胁的敏感值. 公式为:

$$Q_{sj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^2}{k^2 + D_{sj}^2} \right) \right] \tag{3}$$
$$D_{sj} = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^Y \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y \cdot i_{rxy} \cdot \beta_x \cdot S_{jr} \tag{4}$$

式中, Q_{sj} 为生活环境质量, H_j 为生活环境适宜度指数, D_{sj} 为生活环境退化程度, k 为半饱和常数, w_r 为威胁因子权重, r_y 为威胁因子个数, i_{rxy} 为威胁因子对栅格中生活环境的威胁作用, β_x 为栅格 x 的可达性水平, S_{jr} 为

生活环境类型 j 对威胁因子的敏感性。其中威胁因子权重 w ，参照模型的实例介绍，并结合杞麓湖流域的实际情况及相关研究进行赋值。威胁因子对生活环境质量的敏感度 β ，遵循自然生境类型>半人工生境类型>人工生境类型的原则，依据 InVEST 模型指导手册及国内同类研究进行赋值。

2.2.3 基于列表清单法的洪水调蓄重要性评价 列表清单法是 Little 于 1971 年提出的利用开列清单进行影响评价的方法，在生态保护区域识别过程中，选取特定的具有生态价值的区域列入名录。杞麓湖流域内具有洪水调蓄能力的生态系统有湖泊、水库、坑塘和沼泽等。参考相关研究^[32-33]，依据湖泊、沼泽、水库等生态系统的不同容水量进行定性评价。杞麓湖和主要入湖河流的洪水调蓄能力最强，纳入极重要区域，小型水库纳入高度重要区域，沟渠、坑塘纳入中等重要区域，沼泽、植被纳入一般重要区域。

2.2.4 基于层次分析法的生态敏感性评价 生态敏感性评价一般包括水土流失敏感性评价、盐渍化敏感性评估、石漠化敏感性评价及土地沙化敏感性评价。在以上问题中，杞麓湖流域存在较严重的问题是水土流失。在参考相关研究的基础上，从实际出发，结合《生态保护红线划定指南指南》中的指标，选取了沟谷密度、土壤可蚀性、地形坡度及土地利用类型 4 个指标对杞麓湖流域的水土流失敏感性进行分析与评价，并运用层次分析法确定各项指标的权重，分别为 0.24、0.22、0.22 和 0.32（表 2）。根据赋权并进行叠加计算得到水土流失敏感性指数，使用自然断点法将敏感性指数由低到高依次划分为一般、敏感、中等敏感、高度敏感和极敏感 5 个等级。沟谷密度和坡度因子分别通过 ArcGIS 里 Spatial Analyst Tools 工具集的 Hydrology 和 Slope，基于 DEM 数据进行提取计算；土地利用因子基于土地覆盖数据利用栅格计算器获取；土壤可蚀性因子的计算同水土保持生态重要性评价中的土壤可蚀性因子方法相同。公式为：

$$SS_j = \sum_{i=1}^{n=4} S_i \cdot n_i \tag{5}$$

式中， SS_j 为 j 空间单元生态敏感性指数， S_i 为 i 因素敏感性等级值， n_i 为因子的权重。

表 2 生态敏感性评价分级标准

Tab.2 Classification standard of eco-environment sensitive vulnerability assessment

影响因素	赋值	划分标准	权重
沟谷密度	1	沟谷密度小于 0.5 的区域	0.24
	3	沟谷密度介于 0.5~1 的区域	
	5	沟谷密度介于 1~1.5 的区域	
	7	沟谷密度介于 1.5~2 的区域	
	9	沟谷密度大于 2 的区域	
地形坡度	1	坡度小于<5 度的区域	0.22
	3	坡度介于 5~15 度的区域	
	5	坡度介于 15~20 度的区域	
	7	坡度介于 20~25 度的区域	
	9	坡度大于 25 度的区域	
土壤可蚀性	1	土壤可蚀性等于 0(湖泊区域)	0.22
	3	土壤可蚀性介于 0~0.0150 的区域	
	5	土壤可蚀性介于 0.0150~0.0156 的区域	
	7	土壤可蚀性介于 0.0150~0.0180 的区域	
	9	土壤可蚀性大于 0.0180 的区域	
土地利用类型	1	水域	0.32
	3	林地、果园、灌木	
	5	建设用地	
	7	草地沼泽	
	9	耕地、其他	

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能及生态敏感性评价

在国土空间开发与保护格局下,生态系统服务功能重要性评价不仅能够识别对生态可持续发展具有重要意义区域,而且可以明确其空间分布,解决生态保护红线“划在何处”的问题.生态敏感性评价可以定量评估区域内发生生态环境问题的可能性和难易程度,解决生态保护红线“划分”等级的问题,二者结合能够共同促进生态环境的保护.

水源涵养是一项重要的水文调节功能,受地形地貌、土壤、土地覆盖、气候等多种因素的影响.如图 2a, 杞麓湖流域水源涵养功能极重要区主要位于林地覆盖度较高的山区,西南、西北部的山区分布面积较广且集中,距湖泊较远,东南、东北部呈现交叉分布状态,较为分散;高度重要区集中在西南部,与极重要区穿插分布;中等重要区主要分布在杞麓湖的东南、东北部;重要区紧邻杞麓湖西南、西北部,分布较集中;一般重要区零散分布在重要区域内,土地覆盖以建设用地为主.

水土资源是人类赖以生存的物质基础,水土保持服务不仅能有效缓解区域水土流失,保证生态安全,还能保护水源、改良土壤等,与地形、地表覆被等因素息息相关.如图 2b,杞麓湖流域水土保持功能极重要区与高度重要区的分布方式较为一致,呈带状分布,主要集中于海拔较高的山区,极重要区的坡度大于 25° ,高度重要区的坡度大于 17° ;一般重要区分布较广,地表覆盖以建设用地及农田为主,地势平坦,人类干扰较强,此外也零星分布于坡度较缓的山区.

随着人类对生物资源的不合理利用,生物多样性遭受了极大破坏.如图 2c,杞麓湖流域生物多样性极重要区域分布在林地覆盖率较高的山区,西南、西北部的山区分布面积较广且集中;极重要区面积为 132.199 km^2 ,约占流域面积的 37.4%;高度重要区包括湖泊边缘的沼泽及西北、东南部山区,重要区地表覆盖以农作物为主,分布较广;一般重要区主要为建设用地,人类活动频繁,地表植被覆盖程度最低,生物多样性受到严重限制.

湖泊在蓄纳洪水中发挥着重要作用,水库是我国现代防洪的重要工程体系.如图 2d,杞麓湖和入湖河流洪水调蓄能力最强,因此纳入极重要区域,入湖河流主要包括红旗河、中河、大新河及者湾河等;高度重要区包括甸苴坝水库、台家山水库、鸡脖子水库和三岔河水库等小型水库;中等重要区包括零星分布的坑塘、沟渠;重要区包括杞麓湖周边的沼泽、山坝及植被覆盖率较高的林地;一般重要区包括耕地和建设用地,地势平坦,植被相对较少,其中建设用地地表渗水能力弱,当洪水来临时不能有效下渗、吸纳洪水.

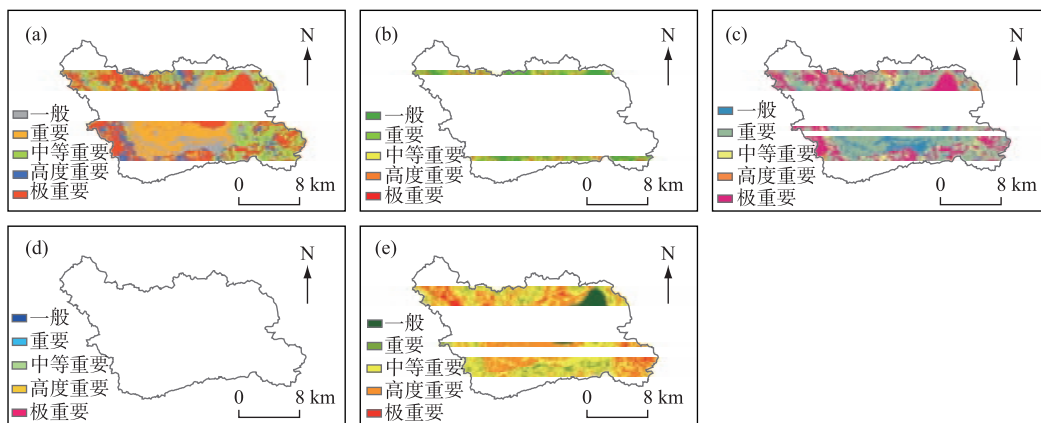


图 2 生态系统功能评价:水源涵养重要性评价(a)、水土保持重要性评价(b)、生物多样性重要性评价(c)、洪水调蓄重要性评价(d)及生态敏感性评价(e)

Fig.2 Ecosystem function assessment: Importance assessment of water conservation (a), importance assessment of water and soil conservation (b), importance assessment of biodiversity (c), importance assessment of flood regulation and storage (d) and ecological sensitivity assessment (e)

当外界的干扰超过生态系统维持自身平衡的能力,就会产生严重的生态问题. 如图 2e,杞麓湖流域生态极敏感区分布于者湾河、长沙河、大沙河及杞麓湖东南、北部植被覆盖率较低的山区坡面,土地覆盖以耕地为主;高度敏感区包括坝区西南部和山区的零星耕地,该区域的土壤可蚀性较高,农作物保水、保土较差;中度敏感区包括植被覆盖率较高的山区、湖泊东南部的坝区及湖泊东部,该区域土壤发育相对较好,沟谷密度较低;敏感区集中分布在河流及杞麓湖周边的沼泽区,也零星分布于山区的林地.

3.2 生态保护红线的划定

3.2.1 生态红线保护区的确定 根据《生态红线划定指南》,研究将杞麓湖流域水域岸线保护区、饮用水源保护区及生态公益林纳入禁止开发区(图 3a). 其中,水域岸线保护区参考《全国河道(湖泊)岸线利用管理规划技术细则》,选取最高水位到湖泊水的区域纳入禁止开发区;饮用水源保护区选取流域内面积较大的具有人饮功能的水库纳入禁止开发区;依据国家及省级划定的公益林保护区,将生态公益林纳入禁止开发区. 杞麓湖流域的生态系统整体比较脆弱,对于生态极重要区和生态极敏感区的识别,应坚持“应保尽保,应化尽化”的原则. 因此,研究将上述生态系统服务功能重要性评价中的极重要区域划定为重要生态功能区(图 3b). 将生态敏感性评价的极敏感区域划定为生态敏感区(图 3c). 对划定重要生态功能区、生态敏感区进行空间叠加,将相对聚集或邻近图斑聚合为完整连片的生态斑块并扣除斑块面积小于 1 km²的范围,随后与禁止开发区叠加,获取杞麓湖流域初步划定的生态保护红线区(图 3d).

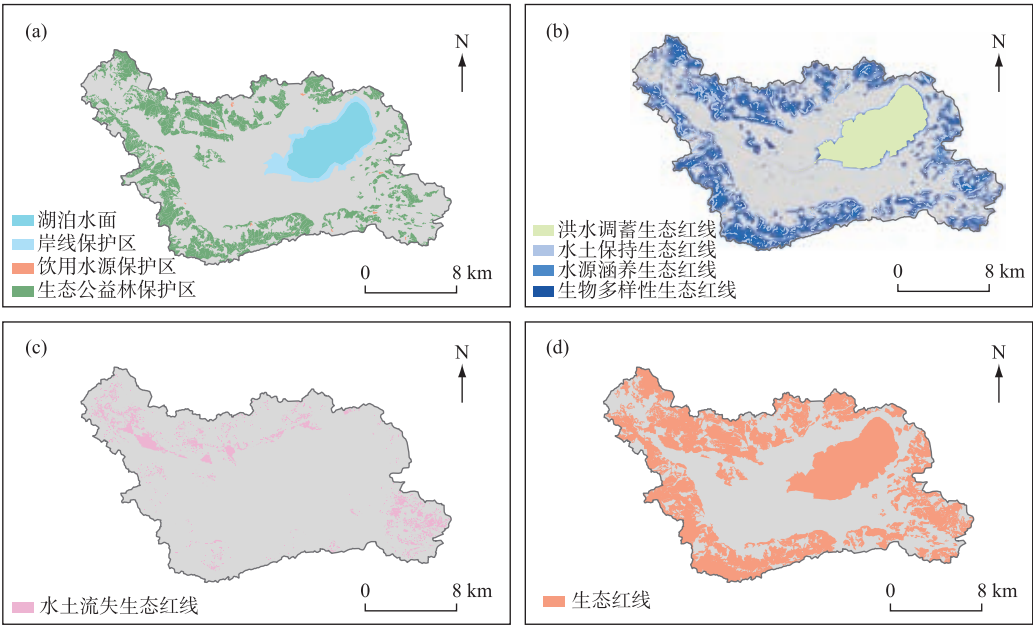


图 3 生态红线保护区:禁止开发区(a)、重要生态功能区(b)、生态敏感区(c)及初步划定的生态保护红线区(d)

Fig.3 The zone of ecological protection red line: Prohibited development zone (a), important ecological function zone (b), ecological sensitive zone (c) and preliminary demarcation of ecological protection red line (d)

3.2.2 顾及生态安全格局的生态保护红线划定 研究过程中以生态系统服务功能评估及生态敏感性评价为主,提出了流域的生态安全格局体系(图 4a). 水域核心保护区包括杞麓湖正常蓄水位以下的全部水域及沿湖岸线保护区,该区域具有较强的洪水调蓄能力,同时能够提供丰富的水产品、水资源和娱乐等. 陆域核心保护区包括陆域生态功能极重要区即距杞麓湖较远的山区,该区域能够有效地减少流域的输沙量和入湖淤泥,同时也是流域的绿色水库,具有防治污染,改善水质、滞洪蓄洪及保护野生动物的功能. 生态缓冲区包括陆域保护区周围的缓冲区、连接湖泊与周围核心陆域保护区的河流生态廊道及环湖生态带,该区域促

进了湖泊与环湖生态保护区之间的信息流通,保障了区域生态系统物质、信息交换的顺畅,提高了流域生态系统的稳定性.生态协调区以基本农田为主,是生态敏感性较高的区域,可以协调生态空间与建设用地间的关系.生态修复区包括生态极敏感的区域,对保证生态稳定具有极其重要的作用.

结合杞麓湖流域的生态安全格局体系,通过各类生态红线保护区得到杞麓湖流域的生态保护红线(图4b).一级生态保护红线范围是初步划定的生态保护红线,包括生态极重要区、生态极敏感区域及湖泊岸线、水库.该范围的生态空间是构成杞麓湖流域生态安全格局体系的核心,也是维持流域生态系统稳定的重点区域.二级生态保护红线范围是流域内的生态缓冲区及生态廊道,包括环湖生态缓冲区、山区林地生态缓冲区及以河流为主的生态廊道.其中,环湖生态缓冲区应配套建设人工湿地系统、环湖景观和生态防护带,从而提升湖泊周围生态系统的截污及水质净化能力,提升环湖生态景观和土地利用价值.三级生态保护红线范围为生态协调区,土地覆盖以农田为主,常年耕种的经济作物单一,土壤养分比例不协调.

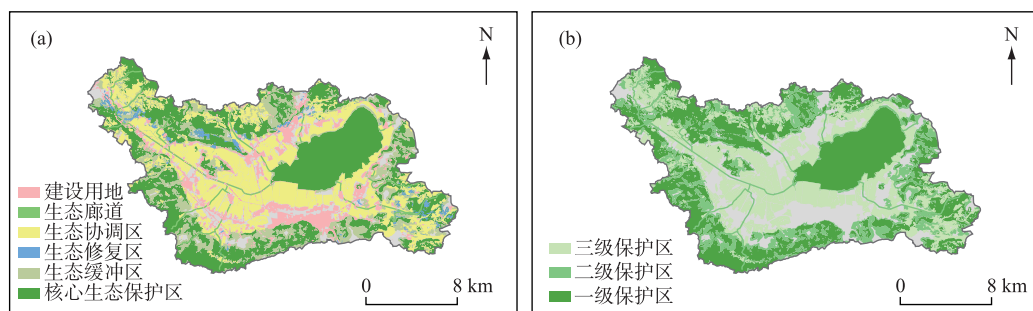


图4 生态安全格局体系(a)及生态保护红线划定(b)

Fig.4 Ecological security pattern system (a) and the demarcation of ecological protection red line (b)

3.2.3 生态保护区与基本农田、建设用地的协调性分析 为了协调流域内的生产、生活与生态空间,整体谋划国土空间开发和保护,将一、二级生态保护红线范围与流域的建设用地、基本农田保护区进行叠加,获取流域协调空间的生态保护红线范围.杞麓湖流域的现状建设用地区域与生态保护红线划定的结果较为协调,一级保护区与建设用地区域几乎没有冲突,而二级保护区与建设用地存在相互冲突的地方,冲突区域零星分布于建设用地向山区延伸方向的边沿,且冲突区域主要围绕核心保护区的缓冲区,景观类型以林地为主(图5a).相对于与建设用地,杞麓湖流域的基本农田保护区与生态保护红线划定结果冲突区域较多,主要分布在湖泊周围的环湖缓冲区、湖泊西北、东南部的缓冲区(图5b).

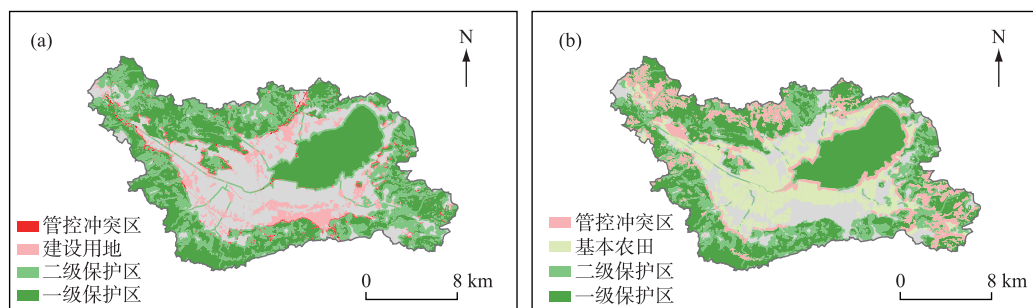


图5 建设用地与生态保护区协调(a)、基本农田保护区与生态保护区协调(b)

Fig.5 Coordination between construction land and ecological protection area (a), coordination between basic farmland and protection area and ecological protection area (b)

3.3 生态保护红线管控路径

以国土综合整治为抓手,发挥空间管控边界的底线约束作用,构建生态保护红线管控命运共同体势在

必行。结合 2018 年底的无人机航拍影像和实地调研对生态保护红线重点管控区域进行识别。图 6 中,点 a、b、c、d、f 均为一、二级生态保护红线范围的交界,点 e 为一、二、三级生态保护红线范围的交界。由点 a 看出,杞麓湖中存在水葫芦等水生植物,水质易受感染,同时建设用地逐渐侵蚀水体。点 b、c、d、f 显示在湖泊与建筑交界处,直接接触范围较多,近岸水质易受人为破坏,若产生超过约束的行为,如私自在湖边建房,则不利于湖泊的水质净化,同时缓冲带的建设不足,不利于环湖生态景观的发展。点 e 显示,由于公路等基础设施的建设,周边林地受到一定程度的影响,建设用地与林地产生冲突,不利于生态敏感区的保护,对于以上情况,结合保护范围提出管控措施。

对于一级生态保护红线范围,生态极敏感区应采取相关的生态修复技术进行生态功能的保护,对于沿湖岸线应有计划地开展退耕还湖、草、林,提升湖泊周围生态系统的截污及水质净化能力,提升环湖生态景观和土地利用价值。应实行最严厉的生态保护制度,原则上除重大基础设施以外,如生态修复工程等,禁止一切形式的扩建、新增等建设活动^[23]。对于二级生态保护红线范围,环湖缓冲区应配套建设人工湿地系统、环湖景观和生态防护带,对有开发需求的区域,严禁开展损坏其主导生态功能的开发及建设活动。三级生态保护红线范围内整体上生态较为敏感,同时存在人类活动的影响使生态进一步恶化的因素,建议通过生态修复进行整体优化,提高生态环境承载能力。对于生态保护区与建设用地的冲突区域,在先前未确定主体功能的前提下,可将冲突区域纳入建设用地,加强生态绿化,对该区域的边界进行严格控制,防止建设用地的扩张延伸至一级保护区。对于生态保护区与基本农田的冲突,建议维持原景观,但应依据管控规则进行相应保护。而二级保护区与基本农田的冲突区域,建议对环湖冲突区域退耕还林,其他管控的冲突区维持农田原有景观且进行有效保护。另外,可采取生态补偿机制,全面评价水域周边地区各类建设项目对流域生态环境带来的损失,建立流域生态补偿标准体系。

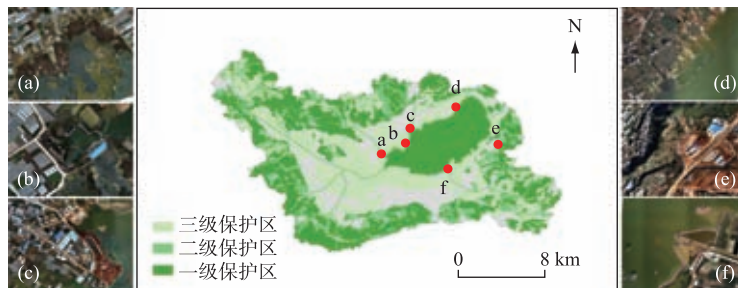


图 6 生态保护红线重点管控示意图

Fig.6 Administration of ecological protection red line

4 结果与讨论

在当前我国全面开展国土空间规划工作的背景下,本文基于生态系统服务功能评估和生态敏感性评价对杞麓湖流域进行生态安全格局体系的构建,制定了微观尺度的生态保护红线划定方案。具体结论如下:

1) 生态系统服务功能评估和生态敏感性评价为区域生态格局的构建提供了要素基础。水源涵养、水土保持、生物多样性、洪水调蓄重要性评价中的极重要区域叠加得到生态系统服务功能极重要区。者湾河、长沙河、大沙河及沟谷密度较大的山区敏感性最高,坝区整体生态敏感性较高。

2) 结合生态安全格局,通过各类生态红线保护区得到杞麓湖流域的生态保护红线。一级生态保护红线范围包括生态极重要区、生态极敏感区及湖泊岸线、水库。二级生态保护红线范围包括环湖生态缓冲区、山区林地生态缓冲区及以河流为主的生态廊道。三级生态保护红线范围为生态协调区,土地覆盖以农田为主。

3) 一级生态保护红线范围内的生态极敏感区应采取相关的生态修复技术进行生态功能的保护。二级生态保护红线范围以生态保护为重点,保持该区域的生态环境质量。三级生态保护红线范围通过生态修复进行整体优化,提高整体的生态环境承载能力。对于生态保护区与建设用地的冲突,可将冲突区域纳入建设用地。对于生态保护区与基本农田的冲突,建议维持原景观,但应依据一级保护的管控规则进行保护。

生态保护红线划定和管控是建立国土空间规划体系的重要组成. 在管控路径上, 未来可以结合无人机数据重点关注水域面积的变化情况, 为后续建立空—天—地立体的水域岸线巡查监控的技术路线提供依据, 为国家发展规划落地提供空间保障. 以国土空间规划为统领, 结合水资源利用、水污染防治等各要素的空间利用, 综合解决存在的冲突问题, 进行全域全要素的流域管控, 提升国土空间开发保护质量和效率. 对生态保护红线划定和管控的风险进行评估, 提高规划韧性, 从而构建微观尺度上的生态保护红线划定及管控监测预警长效机制.

5 参考文献

- [1] Zheng H, Ouyang ZY. Practice and consideration for ecological redlining. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(4): 457-461. [郑华, 欧阳志云. 生态红线的实践与思考. 中国科学院院刊, 2014, **29**(4): 457-461.]
- [2] Tian ZQ, Jia KJ, Zhang H *et al.* Analysis on the policy evolution of drawing the ecological red line in China. *Ecological Economy*, 2016, **32**(9): 140-144. [田志强, 贾克敬, 张辉等. 我国划定生态红线的政策演进分析. 生态经济, 2016, **32**(9): 140-144.]
- [3] Wan J, Yu L, Zhang PP *et al.* Delimitation of urban ecological protection line and practice. *Environmental Protection Science*, 2015, **41**(1): 6-11. [万军, 于雷, 张培培等. 城市生态保护红线划定方法与实践. 环境保护科学, 2015, **41**(1): 6-11.]
- [4] Day JC. Zoning—lessons from the great barrier reef marine park. *Ocean & Coastal Management*, 2002, **45**(2): 139-156.
- [5] Hannah L, Midgley G, Andelman S *et al.* Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2007, **5**(3): 131-138.
- [6] Liu D, Lin NF, Zou CX *et al.* Development of foreign ecological protected areas and linkages to ecological protection red-line delineation and management in China. *Biodiversity Science*, 2015, **23**(6): 708-715. [刘冬, 林乃峰, 邹长新等. 国外生态保护地体系对我国生态保护红线划定与管理的启示. 生物多样性, 2015, **23**(6): 708-715.]
- [7] Jiang DL, Cao XF, Kuang HH *et al.* Ecological red line planning and related key issues analysis for China. *Resources Science*, 2015, **37**(9): 1755-1764. [蒋大林, 曹晓峰, 匡鸿海等. 生态保护红线及其划定关键问题浅析. 资源科学, 2015, **37**(9): 1755-1764.]
- [8] Li XC, He JH. Research on the technical methods of the delimitation of ecological red line for Ezhou. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, **40**(1): 50-55. [李晓翠, 何建华. 生态红线划定的技术方法研究——以鄂州市为例. 测绘与空间地理信息, 2017, **40**(1): 50-55.]
- [9] Liu JH, Ma S, Gao JX *et al.* Delimiting the ecological conservation redline at regional scale: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2652-2657. [刘军会, 马苏, 高吉喜等. 区域尺度生态保护红线划定——以京津冀地区为例. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2652-2657.]
- [10] Kong LQ, Wang YQ, Zheng H *et al.* A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 835-843. [孔令桥, 王雅晴, 郑华等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例. 生态学报, 2019, **39**(3): 835-843.]
- [11] Yu KJ, Wang SS, Li DH *et al.* Ecological baseline for Beijing's urban sprawl: Basic ecosystem services and their security patterns. *City Planning Review*, 2010, **34**(2): 19-24. [俞孔坚, 王思思, 李迪华等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, **34**(2): 19-24.]
- [12] Li YG, Li ZS, Feng Q *et al.* Research on the development of the ecological protection of the Qilian Mountains based on ecological redline. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(7): 2343-2352. [李永格, 李宗省, 冯起等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究. 生态学报, 2019, **39**(7): 2343-2352.]
- [13] Wang YC, Lv D, Peng ZW *et al.* The demarcation of ecological red line based on ecological network planning: A case study of Nanyi Lake Region in Anhui Province. *Urban Planning Forum*, 2015, (3): 28-35. [王云才, 吕东, 彭震伟等. 基于生态网络规划的生态红线划定研究——以安徽省宣城市南漪湖地区为例. 城市规划学刊, 2015, (3): 28-35.]
- [14] Zhao DH. Evaluation of ecological security pattern and ecological red line drawn research—Based on analysis of fragmentation. *Fujian Architecture & Construction*, 2017, (11): 15-21. [赵殿红. 生态安全格局评价和生态红线划定研究——基于破碎化分析. 福建建筑, 2017, (11): 15-21.]
- [15] Jiang SQ, He JH. Multi scene simulation of urban ecological protection red line based on Multi-agents model. *Territory &*

- Natural Resources Study*, 2016, (1): 16-20. [蒋思琦, 何建华. 基于多智能体的城市生态保护红线多情景模拟. 国土与自然资源研究, 2016, (1): 16-20.]
- [16] Li B, He JH, Qu S *et al.* A method of delimiting urban ecological red line protection area based on bayesian network. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 800-811. [黎斌, 何建华, 屈赛等. 基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法. 生态学报, 2018, **38**(3): 800-811.]
- [17] Ding YC, Feng CC, Wang LW. Determination of ecological red line of mountainous areas: A case study of Yihe Town in Chongqing Municipality. *Progress in Geography*, 2016, **35**(7): 851-859. [丁雨霖, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究——以重庆市涪陵区义和镇为例. 地理科学进展, 2016, **35**(7): 851-859.]
- [18] Lin Y, Fan JF, Wen Q *et al.* Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(5): 1244-1252. [林勇, 樊景凤, 温泉等. 生态红线划分的理论和技术. 生态学报, 2016, **36**(5): 1244-1252.]
- [19] Hu F, Yu YQ, Zheng Y *et al.* An innovative study of ecological red line delimitation. *Planners*, 2018, **34**(5): 108-114. [胡飞, 余亦奇, 郑玥等. 生态保护红线划定方法研究. 规划师, 2018, **34**(5): 108-114.]
- [20] Bo J, Yang B, Christina P *et al.* China's ecological civilization program-Implementing ecological redline policy. *Land Use Policy*, 2019, **81**: 111-114.
- [21] Bai Y, Jiang B, Wang M *et al.* New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2016, **55**: 348-351.
- [22] Yang B, Wong CP, Bo J *et al.* Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 3034.
- [23] Zhou WZ. A Study on available water capacity of main soil types in China based on GIS [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. [周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2003.]
- [24] You SC, Di SC, Yuan Y. Study on soil field capacity estimation in the loess plateau region. *Journal of Natural Resources*, **24**(3): 545-552. [游松财, 邸苏闯, 袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算. 自然资源学报, 2009, **24**(3): 545-552.]
- [25] Lu XP. Simulation study on erosivity of hilly area of purple soil [Dissertation]. Chongqing: Southwest University, 2006. [卢喜平. 紫色土丘陵区降雨侵蚀力模拟研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2006.]
- [26] Shi DM, Jiang D, Lu XP *et al.* Temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Fuling District, Chongqing. *Transactions of the CSAE*, 2008, (9): 16-21. [史东梅, 江东, 卢喜平等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征. 农业工程学报, 2008, (9): 16-21.]
- [27] Meccool DK, George GO, Freckleton M *et al.* Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region. *Transactions of the ASAE*, 1993, **36**(4): 1067-1071.
- [28] Liu BY, Nearing MA, Risse LM. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(5): 1759-1763.
- [29] Remortel RDV, Hamilton ME, Hickey RJ. Estimating the LS Factor for rusle through iterative slope length processing of digital elevation data within arcInfo grid. *Surveyor*, 2001, **30**(1): 27-35.
- [30] Bai J, Liu J, Yu KY. Evaluation of change in the ecological quality for Minjiang river basin based on the InVEST-Biodiversity model. *China Science Paper*, 2015, (15): 1782-1788. [白健, 刘健, 余坤勇. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价. 中国科技论文, 2015, (15): 1782-1788.]
- [31] Du SX, Rong YJ. The biodiversity assessment of land use in Shanxi Province based on InVEST model. *Environment and Sustainable Development*, 2015, **40**(6): 65-70. [杜世勋, 荣月静. 基于 InVEST 模型山西省土地利用变化的生物多样性功能研究. 环境与可持续发展, 2015, **40**(6): 65-70.]
- [32] He JH, Zhan WX, Huang JL. Research on the technical methods of the delimitation ecological red line for Wuhan based on GIS. *Ecological Science*, 2018, **37**(5): 131-139. [何建华, 詹皖欣, 黄俊龙. 基于 GIS 的武汉市生态红线划定的技术方法研究. 生态科学, 2018, **37**(5): 131-139.]
- [33] Chang B, Zhang LJ, Song JJ *et al.* Evaluation on importance of ecosystem service function in Pingdingshan City. *Environmental Science and Management*, 2014, **39**(6): 173-176. [常斌, 张丽娟, 宋建军等. 平顶山市生态服务功能重要性评价研究. 环境科学与管理, 2014, **39**(6): 173-176.]