

县域水生态空间识别及其分布特征

康丽婷^{1,2,3}, 胡希军^{1,2,3}, 罗紫薇^{1,2,3}, 韦宝婧^{1,2,3}, 周冬梅^{1,2,3}

(1.中南林业科技大学风景园林学院,长沙 410004;2.中南林业科技大学城乡景观生态研究所,
长沙 410004; 3.湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心,长沙 410004)

摘要: 科学地识别区域水生态空间并分析其分布特征对水生态空间的规划和洪涝灾害等水生态问题的调控具有重要意义。以湖南省临澧县为研究区,构建水生态空间分类体系,借助 GIS 及 RS 平台,识别区域显性水生态空间,可视化水源涵养、水土保持、洪水调蓄 3 种隐性水生态空间,定量分析各水生态空间分布特征,并将整合的显、隐性水生态空间与土地利用现状图叠加分析。结果表明:(1)显性水生态空间占临澧县总面积的 4.73%,以点状、斑块状、带状及枝状分布于县域,处于低海拔、较缓坡区;(2)隐性水生态空间面积占比为 49.97%,少于水源涵养、水土保持和洪水调蓄空间面积占比总和 69.68%,三者分别占比 15.44%, 38.07%,16.17%,均呈现“小集中、大分散”的特征,识别结果直观地反映了维护区域水生态安全的空间分布特征;(3)水生态空间占临澧县总面积的 49.99%,主要分布于道水、澧水及其支流周边区域,中小型水库区域呈斑块散布;(4)水生态空间中的耕地和建设用地的所占比例分别为 44.40%,21.19%,表明水生态空间与人类活动剧烈的非生态用地类型存在重叠空间。研究结果揭示了临澧县土地利用现状与水生态空间存在冲突,后期可重新规划水生态空间中的非生态用地类型,以期高效保护水生态空间和规避水生态安全问题。

关键词: 显性水生态空间; 隐性水生态空间; 水生态空间识别; 水土保持; 水源涵养; 洪水调蓄; 空间分布

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0170-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.023

Identification and Distribution Characteristics of Hydro-ecological Space in Counties

KANG Liting^{1,2,3}, HU Xijun^{1,2,3}, LUO Ziwei^{1,2,3}, WEI Baojing^{1,2,3}, ZHOU Dongmei^{1,2,3}

(1.College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry & Technology,
Changsha 410004; 2.Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South
University of Forestry & Technology, Changsha 410004; 3.Hunan Big Data Engineering
Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Changsha 410004)

Abstract: Scientifically identifying regional hydro-ecological space and analyzing its distribution characteristics were of great significance to the planning of hydro-ecological space and the regulation of hydro-ecological space problems such as flood disasters. Taking Linli County, Hunan Province, as the research area, this study constructed a classification system of hydro-ecological space with the help of GIS and RS platform, regional explicit hydro-ecological space was identified, and the three types of recessive hydro-ecological spaces of regional water conservation, soil and water conservation and flood regulation were visualized. And the distribution characteristics of each water ecological space were quantitatively analyzed. Finally, explicit and recessive hydro-ecological spaces that were integrated were superposed with current land use map for analysis. The results showed that:(1) Explicit hydro-ecological space occupied 4.73% of total area of Linli County, which distributed in dots, patches, bands and branches in the county, and located in a low-altitude, relatively gentle slope area. (2) The area of recessive hydro-ecological space accounted for 49.97%, which was less than 69.68% of the total area of water conservation, soil and water conservation and flood regulation

收稿日期:2021-07-30

资助项目:国家林业局重点学科项目(林人发[2016]21号);湖南省“双一流”培育学科项目(湘教通[2018]469号);中南林业科技大学研究生
科技创新基金项目(CX202101023);湖南省研究生科研创新基金项目(CX20210850)

第一作者:康丽婷(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事景观规划与水生态修复研究。E-mail:1609493323@qq.com

通信作者:胡希军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事景观规划与生态修复研究。E-mail:120795043@qq.com

space, which accounted for 15.44%, 38.07% and 16.17%, respectively, showing the characteristics of “small concentration and large dispersion”. The identification results intuitively reflected spatial distribution characteristics of maintaining regional hydro-ecological security. (3) Hydro-ecological space accounted for 49.99% of total area of Linli County, which mainly distributed in the areas around Daoshui, Lishui and its tributaries. Small and medium-sized reservoirs were scattered in patches. (4) The proportions of cultivated land and construction land in hydro-ecological space were 44.40% and 21.19%, respectively, indicating that there was an overlapping space between hydro-ecological space and non-ecological land types with intensive human activities. This study revealed that current land use was in conflict with the hydro-ecological space in Linli County. The non-ecological land types in the hydro-ecological space could be re-planned later, in order to efficiently protect hydro-ecological space and avoid safety issues of hydro-ecological.

Keywords: explicit hydro-ecological space; recessive hydro-ecological space; identification of hydro-ecological space; soil and water conservation; water conservation; flood regulation; spatial distribution

我国面临洪涝灾害、水土流失等多方面、复杂的水生态问题,表明水生态系统功能和结构受到破坏。水生态空间主要指用来保护水生态功能完善、系统结构稳定及过程完整的各类空间,包括河流湖泊等水域空间、行蓄滞洪涉及的区域、保持水土和涵养水源所需的陆域空间等^[1]。科学合理地辨识区域水生态空间并基于水生态空间格局优化土地利用分布,有利于调控洪涝灾害等水生态问题,为区域水生态空间保护红线划分提供依据。

生态空间识别过程与地理学、生态学、土地学等学科密切相关^[2],其研究内容主要集中在以城市^[3]、城市群^[4]、生态经济区^[5]、国家重点生态功能区^[6]等为研究对象进行生态空间的识别或划定,部分学者^[7]进一步探究了生态空间的时空变化;研究方法以定量分析的因子叠置法为主,并存在一些学者不断尝试运用新方法 with 模型进行生态空间的识别和预测^[8],其中,包括基于生态敏感性和生态功能重要性评价识别区域生态空间^[4]。水生态空间作为生态空间的重要组成部分,国内相关研究正处于起步阶段,主要聚焦在水生态空间管控^[9]、水生态文明评价^[10]、水生态功能区划^[11]等方面。国外学者们对与水生态空间密切相关的研究多集中在水生态系统服务^[12]、水生态保护及水资源管理等方面^[13]。综上文献可知,当前我国大中小城市大多被忽视识别和划定承载区域水生态过程的水生态空间是其管控的前提。虽然,也有学者^[14]基于可视性将水生态空间分为显性及隐性水生态空间,但仅仅界定了其概念,没有进一步识别并图示化区域各水生态空间,且鲜有研究对水生态空间分布特征进行科学定量的分析。

洞庭湖流域是长江水系生态安全的生命线,1980年以来,该流域中上游区域生态系统遭受了严重的破坏,水土流失现象普遍,下游频繁发生洪涝灾害^[15]。临澧县作为洞庭湖流域澧水下游的丘陵县域,存在较

严重的水生态问题,属于市级水土流失重点预防区。本研究基于临澧县自然特征和水生态环境状况,根据水生态空间的概念,结合前人相关研究构建水生态空间分类体系。借助 GIS 及 RS 平台,基于土地利用数据提取临澧县显性水生态空间,借鉴生态空间识别方法可视化县域各隐性水生态空间,并结合“中位数中心”和“标准差椭圆”工具定量分析各水生态空间分布规律。最后,将整合的显、隐性水生态空间与土地利用现状图叠加,揭示临澧县水生态空间与土地利用的关系。研究为划定区域水生态空间保护红线提供参考,以期高效保护水生态空间和规避水生态安全问题。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

临澧县属湖南省常德市(图 1),位于湘西北,澧水中下游,地理坐标为 111°24′—111°49′E, 29°17′—29°46′N。全县 10 个乡镇,总面积 1 210 km²,总人口 43.5 万。地形地貌以丘陵为主,地处武陵山余脉与洞庭湖盆地过渡地带。临澧属中亚热带向北亚热带过渡的湿润季风气候,雨水充沛,但分布不均,春末夏初雨水集中,并多暴雨,经常发生洪涝灾害。临澧河网密布,水系发达,县域范围内共有大小河流 119 条,中型水库 5 座,小型水库 146 座,但水利基础设施不够坚实,应对突发性、持续性暴雨的能力较弱。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 数据来源 本研究需要的数据较多,主要数据类型及来源情况见表 1。

1.2.2 数据预处理 参与运算的空间数据均运用 ArcGIS 中的重采样工具统一至 30 m×30 m 精度,坐标区为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_37,并初步进行空间数据处理和分析,数据预处理结果见图 2。

(1)遥感影像数据:采用 2020 年 4 月 Landsat8 OLI 卫星遥感影像数据,运用 ENVI 5.3 软件预处理影像数

据,通过 NDVI 计算提取归一化植被指数,再利用像元二分模型计算研究区植被覆盖度(图 2a);

(2)DEM 数据:依据 DEM 获得坡度、高程等数

据(图 2b、图 2c)。后期运用 GIS 对 DEM 进行填注、流向、汇流累积量及流域划分等水文分析;用于地表径流模拟及洪水淹没区分析;

表 1 数据来源

数据类型	数据来源
2020 年 Landsat 8 遥感影像数据	美国国家地质勘探局网站(https://earthexplorer.usgs.gov)
2020 年湖南省 30 m 精度土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
2020 年湖南省 ALOS 12.5 m DEM 数字高程	http://earthdata.nasa.gov
2018 年湖南省 30 m 精度降雨侵蚀力数据	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
2018 年湖南省 30 m 精度土壤可蚀性因子数据集	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
1959—2019 年临澧县历年气象资料	临澧县气象局
临澧县行政区划数据	临澧县自然资源和规划局

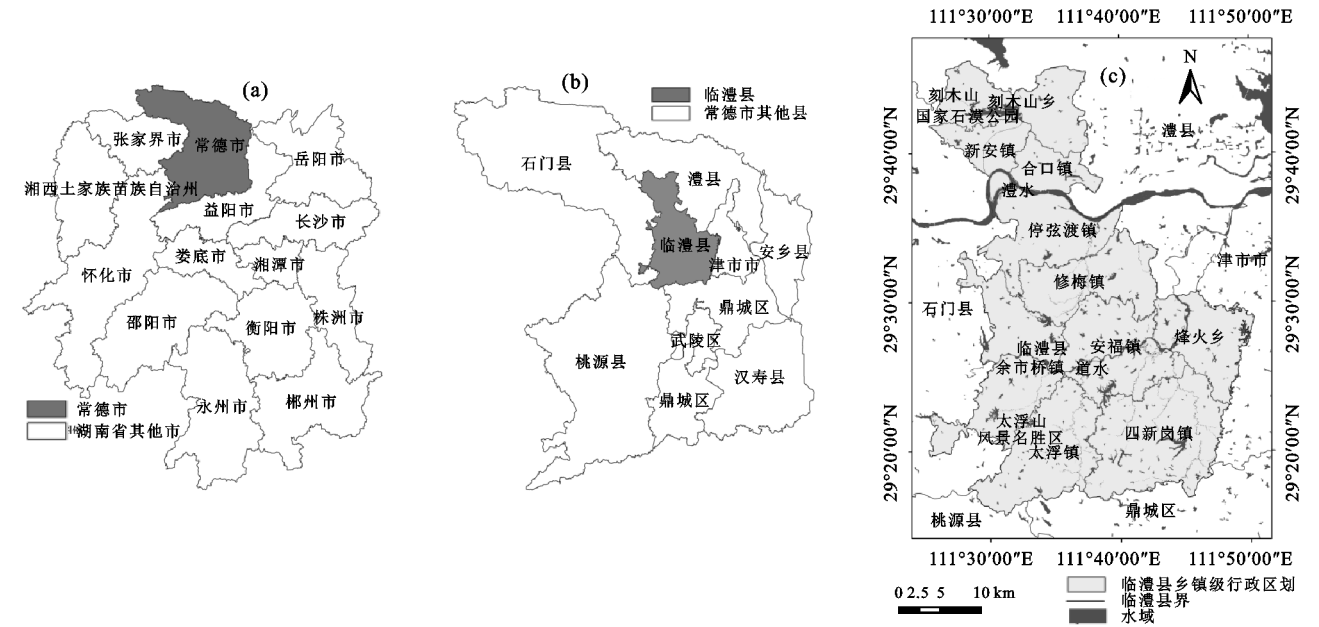


图 1 研究区位置

(3)土地利用数据:参考《土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)》^[16],将土地利用类型归为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 大一级地类。基于土地利用数据提取临澧县显性水生态空间,包括河渠、水库、坑塘、沼泽地等水域(图 2d);

(4)降雨侵蚀力和土壤可蚀性因子数据集:基于临澧县行政边界裁剪湖南省降雨侵蚀力和土壤可蚀性因子(图 2e、图 2f)。

1.3 水生态空间识别方法

1.3.1 水生态空间分类体系的构建 识别区域水生态空间的先决条件是构建水生态空间分类体系。目前,水生态空间分类体系缺少相对统一的划分规范。邓伟等^[14]基于可视性将水生态空间分为显性及隐性水生态空间,认为显性水生态空间是可以用肉眼看到的水域,而隐性水生态空间需要运用各种方法及模型方可获得,该作者还基于成因将水生态空间分为天然、半天然和人为水生态空间。结合张合兵等^[17]的自然生态空间分类体系,本研究基于前文对水生态空间概念的解读,依据

科学性、可行性、完整性原则,将水生态空间划分为显性及隐性水生态空间,并进一步细分为:河渠、湖泊、沼泽地及滩地等天然水生态空间;水库水面、坑塘水面等人工水生态空间;水源涵养空间、水土保持空间及洪水调蓄空间等水生态系统服务空间(表 2)。

1.3.2 基于水生态系统服务功能评价识别隐性水生态空间 运用因子叠加法及模型评价各水生态系统服务功能,基于评价结果识别行蓄滞洪涉及的区域、保持水土及涵养水源所需的陆域空间。

(1)水源涵养。水源涵养作为陆地生态系统的一种重要生态服务,其功能表现形式主要包括调节径流、净化水质、供给淡水。相关研究多采用 NPP 指数评估法和水量平衡方程^[18]进行水源涵养功能重要性评价,但由于本研究地仅为县域,上述方法所需部分数据的精度不够,因此,通过因子叠加法进行水源涵养空间识别。水源涵养功能与坡度、植被覆盖度、土地利用类型和河湖缓冲区距离紧密相关^[19],综合前人^[20]研究及临澧县实际情况对各因子进行分级赋值

(表 3)。在 ArcGIS 中等权叠加各项指标,并按自然断点法分成 5 个等级。

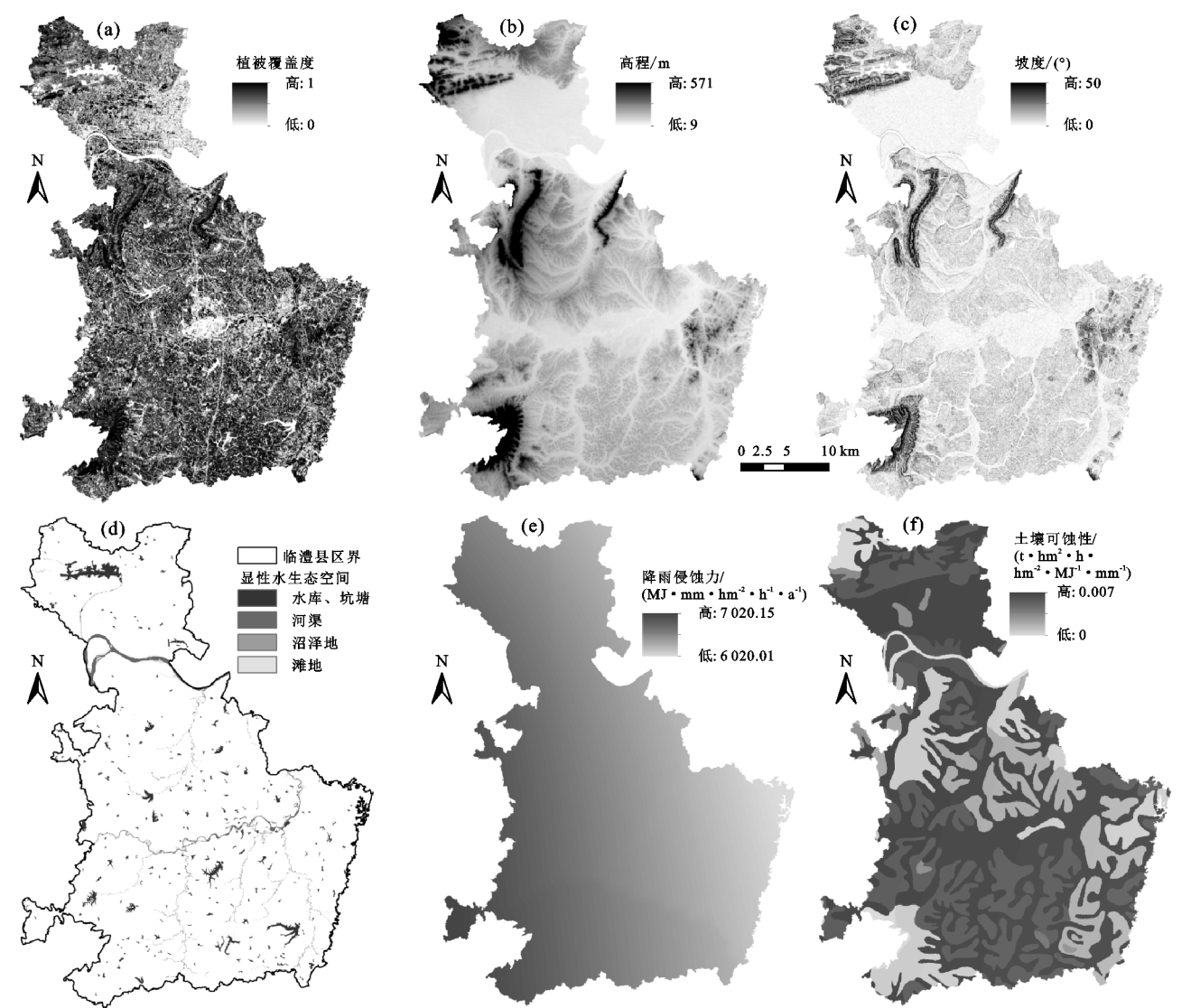


图 2 预处理数据空间分布

表 2 水生态空间分类体系

表现性状 (可视性)	一级类名称	二级类名称	三级类名称	含义
显性水生态空间	天然水生态空间	水域	河渠	天然或人工开挖形成的河经常水位岸线之间的线状或带状水面,主要分布于山谷间
			湖泊	天然形成的积水区常水位岸线所围成的面状水面,主要分布于地势低洼地
		湿地	沼泽地	地表过湿、经常积水的湿生植物生长的土地,主要分布于地势低洼、长期潮湿的区域
			滩地	河、湖水域洪水期与平水期水位之间的区域
	人工水生态空间	人工水面	水库水面	人工开挖河经常水位岸线之间的水面及人工拦截汇集而成的总库容≥10 万 m ³ 的水库正常蓄水位岸线所围成的水面,主要分布于水源地和农耕区
隐性水生态空间	水生态系统服务空间	供给空间	坑塘水面	天然或人工开挖形成的常水位岸线所围成的面积较小的水面
			水源涵养空间	涵养水源功能较强,影响地域对雨洪灾害的防御能力 ^[18]
			水土保持空间	保持水土功能较强,有助于自然植被的降水节流、保水蓄水及径流调节 ^[2]
		调节空间	洪水调蓄空间	调蓄洪水能力较强,可通过自身的涵养水源,保持水土等功能调蓄泄洪 ^[5]

(2)水土保持。水土资源有助于自然植被的降水节流、保水蓄水以及径流调节,水土保持能力越强的地方越需要对其进行保护。采用水土流失方程(RU-SLE)进行水土保持功能评价,该模型评估法结构简

单,准确度较高^[21],是一种表示坡地土壤流失量与其主要影响因素间定量关系的侵蚀数学模型。其模型公式为:

$$A=f\cdot R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P$$
 (1)

式中: A 为水土侵蚀量($t/(hm^2\cdot a)$); R 为降雨侵蚀力($(MJ\cdot mm)/(hm^2\cdot h\cdot a)$); K 为土壤可侵蚀性($((t\cdot hm^2\cdot h)/(hm^2\cdot MJ\cdot mm))$); LS 为地形因

子,无量纲,地形起伏度可以反映坡度和坡长对土壤侵蚀的综合作用; C 为植被覆盖管理因子,无量纲,采用蔡崇法等^[22]学者建立的模型计算; P 为水土保持措施因子,无量纲,参照美国农业部手册并结合研究区土地利用现状对 6 大地类进行赋值,耕地:0.35,林地:0.8;草地:0.6,建设用地:1,水域:0,未利用地:1; f 为单位换算因子,其值为 224.2。

表 3 水源涵养功能重要性评价因子分级

重要性 程度及赋值	指标因子				
	植被覆盖度	坡度/(°)	土地利用 类型	河流 缓冲区/m	水库缓冲区(面积 >100000 m ²)/m
5 级(极重要)	≥0.8	≤5	水域	≤50	≤200
4 级(高度重要)	0.6~0.8	5~8	林地	50~100	200~500
3 级(重要)	0.4~0.6	8~15	耕地	100~150	500~1000
2 级(一般重要)	0.2~0.4	15~25	草地	150~200	1000~1500
1 级(不重要)	<0.2	≥25	建设用地、未利用地	≥200	>1500

最后利用 ArcGIS 中的栅格计算器叠加公式中的各因子,得到其空间分布数据,参考土壤侵蚀(水力侵蚀)强度分级标准,将水土侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强度和极强度 5 个等级,分别对应水土保持服务功能的极重要、高度重要、重要、一般重要和不重要等级。

(3)洪水调蓄。利用洪水淹没范围和河湖缓冲区距离来表示洪水调蓄功能重要性,各评价因子分级赋值^[6]见表 4。根据 1959—2019 年临澧县历年气象资料,结合临澧县历史洪涝灾害分析,确定 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇极端日降雨量。利用 ArcGIS 水文分析模块、3D 分析模块和计算地表产流的 SCS—CN 模型,模拟不同重现期、不同降雨强度下的每个子流域的径流量和洪水淹没范围,具体操作步骤可参考文献[23]。其中,水文分析的研究范围被扩大到洞庭湖区,以避免结果受到行政区线的限制。最后采用 ArcGIS 中的“镶嵌”工具,叠加洪水淹没范围及河湖缓冲区距离,结果按照自然断点法分成 5 个等级。

表 4 洪水调蓄功能重要性评价因子分级

重要性 程度及赋值	指标因子	
	洪水淹没范围	河湖缓冲区距离/m
5 级(极重要)	10 年一遇洪水范围	≤25
4 级(高度重要)	20 年一遇洪水范围	25~50
3 级(重要)	50 年一遇洪水范围	50~100
2 级(一般重要)	100 年一遇洪水范围	100~150
1 级(不重要)	其他区域	≥150

1.4 水生态空间分布特征

通过对显、隐性水生态空间分布情况进行一系列

定量、客观的研究^[24],分析各水生态空间在地域上的水平分异和垂直分异。

1.4.1 各隐性水生态空间平面及立体上的分布规律 本研究基于水生态系统服务功能评价结果划定隐性水生态空间,因此,可先定量分析各水生态系统服务空间分布特征。

使用 ArcGIS 软件中的“中位数中心”计算,找出水源涵养、水土保持和洪水调蓄服务的 5 个重要性等级区域在研究区范围的地理中心分布。通过“标准差椭圆”算法,创建各重要等级区域的标准差椭圆,以概括其整体的位置、方向趋势和离散程度^[25]。基于各水生态系统服务在平面上的分布规律,结合各隐性水生态空间的地理中心位置和标准差椭圆分布,分析各隐性水生态空间平面上的分布规律。

基于自然断点分级法并参考文献[20]将高程和坡度分成 5 个等级,等级划分情况见表 5。通过 ArcGIS 软件将水源涵养、水土保持和洪水调蓄服务功能评价分级矢量图与研究区的高程及坡度分级矢量图联合,分别计算各高程及坡度范围内 3 种水生态系统服务的各重要等级区域面积占比,并运用 Excel 软件制作随高程及坡度范围变化的各重要等级区域面积占比折线图,定量揭示临澧县各隐性水生态空间在高程及坡度上的分布情况。

1.4.2 水生态空间平面及立体上的分布规律 运用 ArcGIS 软件联合显性和隐性水生态空间的矢量数据,对整合的水生态空间进行“中位数中心”及“标准差椭圆”计算,得出水生态空间在平面上的分布规律。将水生态空间矢量数据与高程及坡度分级矢量

图联合,计算各高程及坡度范围内水生态空间的面积及占比。

表 5 高程及坡度分级情况

指标	5级 (低、缓)	4级(较低、 较缓)	3级 (中)	2级(较高、 较陡)	1级 (高、陡)
高程/m	9~51	51~90	90~159	159~288	288~571
坡度/(°)	0~5	5~8	8~15	15~25	25~50

2 结果与分析

2.1 显性水生态空间识别结果及分布特征

基于土地利用数据提取临澧县显性水生态空间,显性水生态空间面积为 5 700.24 hm²,占临澧县总面积的 4.73%,包括河渠、水库、坑塘、滩地等地表水域(图 2f),以点状、斑块状、条状及树枝状分布于县域各乡镇,整体分布较离散,其中澧水及道水属于过境水。

显性水生态空间主要分布在高程 9~51 m 和坡度 5°~8°范围,且显性水生态空间面积随着高程及坡度的增加而减少,表明显性水生态空间一般处于低海

拔的较缓坡地区(表 5、表 6)。值得注意的是,0~5°缓坡范围不存在显性水生态空间,可能是由于该范围的坡度无法产生地表自然流水。

2.2 隐性水生态空间识别结果及分布特征

本研究无法比较临澧县 3 种水生态系统服务功能对总体的贡献值,默认权重相同。基于各水生态系统服务功能重要性评价结果(图 3)提取水源涵养、水土保持、洪水调蓄空间,再将 3 种空间的矢量数据联合,获得临澧县隐性水生态空间。

表 6 显性水生态空间在不同高程和坡度范围的面积及占比

显性水生态空间在 高程上的面积变化			显性水生态空间在 坡度上的面积变化		
高程/m	面积/hm ²	占比/%	坡度/(°)	面积/hm ²	占比/%
9~51	4242.82	74.64	0~5	0	0
51~90	1231.73	21.67	5~8	4996.09	87.94
90~159	201.62	3.55	8~15	459.20	8.08
159~288	8.11	0.14	15~25	204.57	3.60
288~571	0	0	25~50	21.68	0.38

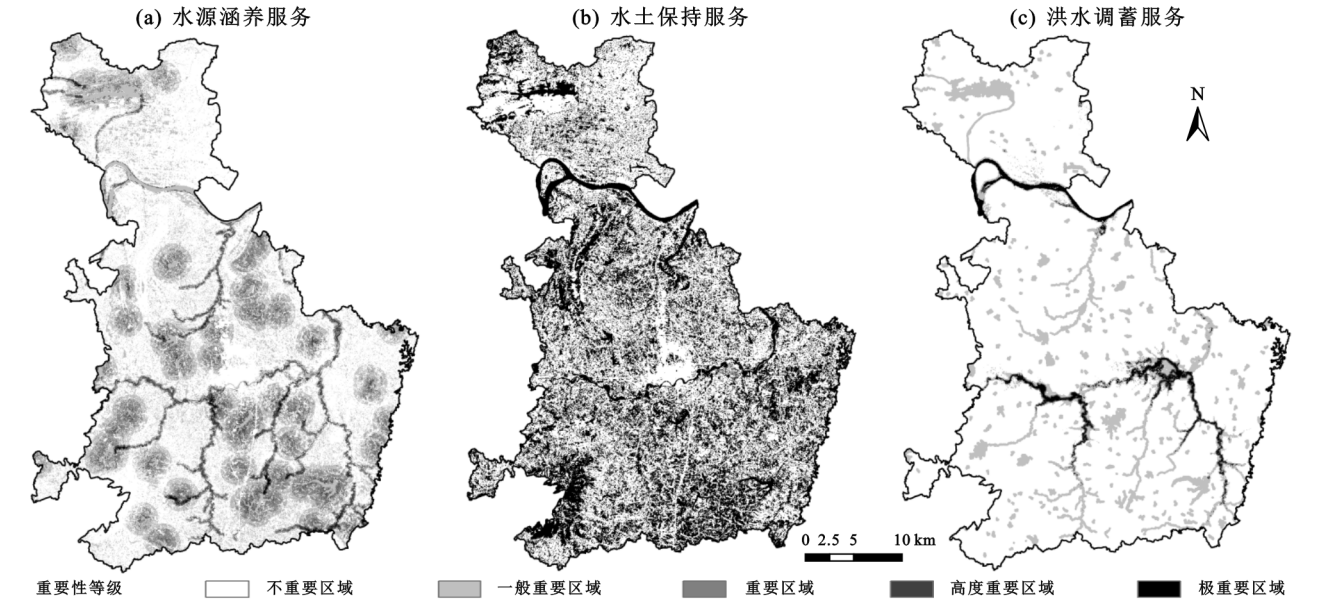


图 3 各水生态系统服务重要性评价结果分布

2.2.1 水源涵养空间

(1)水源涵养服务各重要等级区域数量特征。由表 7 可知,临澧县水源涵养服务的极重要、高度重要和重要区域面积分别为 298.44,3 645.63,14 607.36 hm²,分别占临澧县总面积的 0.25%,3.03%,12.16%。整体来看,随着重要等级提高,临澧县水源涵养服务各等级区域面积越来越小,其中极重要区域面积最小,且各等级区域面积占比相差较大。

(2)水源涵养服务各重要等级区域空间分布特征。由图 4a、表 8 可知,随着重要等级提高,临澧县水源涵养服务各重要等级区域的地理中心由修梅镇

向东南方向移动,最后极重要区域的地理中心落在太平镇和安福镇的交界处,说明随着重要等级的提高,各等级区域分布范围逐渐向南部移动;各等级区域的长短半轴差相差不大,说明不存在有明显方向性的区域;极重要区域的短半轴最小,其他区域的短半轴相差不大,表明极重要区域的分布范围最小,且其他区域的分布范围相当;不重要区域的长半轴最长,显示其最离散。

空间立体上图示化极重要、高度重要及重要等级区域在不同高程、坡度范围的面积占比(图 5a、图 6a)。临澧县水源涵养服务的极重要区域主要分布于

高程 9~51 m 范围;高度重要区域主要分布于高程 9~90 m 范围;重要区域主要分布于高程 9~159 m 范围;随着高程的增加,重要区域面积呈现先增加后降低的状态,极重要及高度重要区域呈现先降低后平稳的状态,总体趋势均下降。极重要和高度重要区域主要分布于坡度 0~5°范围;重要区域主要分布于坡度 0~15°范围;随着坡度的增加,各等级区域面积呈现先剧烈降低再缓慢降低后基本平稳的状态。

(3)水源涵养空间特征分析。将水源涵养服务重要及以上等级区域作为水源涵养空间(图 7a)。水源涵养空间面积不大,为 18 551.43 hm²,占临澧县总面积的 15.44%。水源涵养空间地理中心分布于安福镇,整体较为离散,除合口镇外,其余乡镇均存在不同程度的分布,主要以条状、斑块状散布于县域南部的道水及其支流周边区域,县域北部集中于刻木山乡。这些区域通常植被覆盖度高、地表水资源丰富且地势低平,具有调节河湖流量季节变化和减缓地表径流等作用,识别其对维护地区水资源安全存在较大意义。

2.2.2 水土保持空间

(1)水土保持服务各重要等级区域数量特征。由表 7 可知,随着重要等级提高,临澧县水土保持服务各重要等级区域面积先减后增。其中,不重要区域面积最大,为 73 779.66 hm²,占总面积的 61.49%,极重要区域面积次之,为 45 657.00 hm²,占比为 38.05%,两者共占临澧县总面积的 99.54%;其他等级区域面积积极小,且不存在高度重要区域。说明临澧县水土侵蚀程度呈现 2 个极端,绝大部分区域要么是极强的水土侵蚀,要么是微度的水土侵蚀。

(2)水土保持服务各重要等级区域空间分布特征。由图 4b、表 8 可知,临澧县水土保持服务各重要等级区域的方向分布为西北至东南方向,一般重要

区域的方向性最明显;极重要、不重要区域的短半轴较长,表明两者的分布范围较广,且各等级区域的分布范围存在较大差异;极重要区域的长半轴最长,说明其离散程度较高,重要区域的长半轴最短,显示其较集中。

由图 5b、图 6b 空间立体数据可知,水土保持服务的极重要、不重要区域主要分布于高程 90~159 m 和坡度 0~15°范围,随着高程及坡度的增加,面积均呈现降低的状态,两者的立体空间分布较为相似,说明研究地的高程和坡度对水土保持服务等级的影响有限。面积占比极少的重要、一般重要区域分布于高程 9~51 m 和坡度 0~5°范围,随着高程及坡度的增加,两者的面积基本持平。

(3)水土保持空间特征分析。将水土保持服务重要及以上等级区域作为水土保持空间(图 7b)。水土保持空间面积较大,为 45 682.47 hm²,占临澧县总面积的 38.07%。水土保持空间地理中心分布于安福镇和修梅镇的交界处,分布方向接近正南正北,整体较为离散,部分大斑块集中于道水、澧水及其周边区域,县域南部分布相对较为密集。这些区域地形起伏较小、植被覆盖度较高,很少发生水土侵蚀问题,需要得到重点保护。

2.2.3 洪水调蓄空间

(1)洪水调蓄服务各重要等级区域数量特征。由表 7 可知,随着重要等级提高,临澧县洪水调蓄服务各重要等级区域面积先减少后增加。其中,不重要区域面积最大,为 100 763.40 hm²,占临澧县总面积的 83.83%,远远高于其他 4 个重要等级区域的面积总和;重要区域面积最小,为 781.11 hm²,占总面积的 0.65%;与重要区域面积基本等同的极重要、高度重要区域面积分别为 2 047.41,1 189.26 hm²,占比分别为 1.70%,0.99%。

表 7 水生态系统服务各重要等级区面积及占比统计

重要性程度 及赋值	水源涵养服务		水土保持服务		洪水调蓄服务	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
5 级(极重要)	298.44	0.25	45657.00	38.05	2047.41	1.70
4 级(高度重要)	3645.63	3.03	0	0	1189.26	0.99
3 级(重要)	14607.36	12.16	25.47	0.02	781.11	0.65
2 级(一般重要)	34047.27	28.33	522.90	0.44	15417.36	12.83
1 级(不重要)	67576.14	56.23	73779.66	61.49	100763.40	83.83

注:临澧县隐性水生态空间面积为 60 163.83 hm²,占临澧县总面积的 49.97%,少于水源涵养、水土保持、洪水调蓄 3 个空间的面积占比总和 69.68%,说明各隐性水生态空间之间存在重叠区域。

(2)洪水调蓄服务各重要等级区域空间分布特征。由图 4c、表 8 可知,随着重要等级提高,临澧县洪水调蓄服务各等级区域的地理中心由安福镇与修

梅镇的交界处向东南方向移动,落在安福镇后又向西北方向移动,最后极重要区域的地理中心落在停弦渡镇,说明区域分布范围的变化程度较小;各重要等级

区域的长半轴和短半轴相差不大,说明它们的离散程度和分布范围相当,均较离散。

空间立体上图示化极重要、高度重要、重要及一般重要等级区域在不同高程、坡度范围的面积占比(图 5c、图 6c)。临澧县洪水调蓄服务的极重要、高度重要和重要区域主要分布于高程 9~51 m 和坡度 0~5°范围,随着高程及坡度的增加,三者的面积均呈现先降低后趋于零的状态;一般重要区域主要分布于高程 9~159 m 和坡度 0~15°范围,随着高程及坡度的增加,该区域面积呈现持续降低的状态。

(3)洪水调蓄空间特征分析。将洪水调蓄服务一般重要及以上等级区域作为洪水调蓄空间(图 7c)。洪水调蓄空间面积较小,为 19 435.14 hm²,占临澧县

总面积的 16.17%。洪水调蓄空间地理中心分布在安福镇,整体较为离散,大斑块主要分布于临澧县域范围道水、澧水及其支流周边区域、刻木山的官亭水库及周边区域,其余呈小斑块、点状散布于县域。这些区域地势较低且与江河联系密切,同时,由于过境水丰富,极易因强降水、上游泄洪等原因造成洪涝灾害,威胁人民生活 and 居住安全,识别洪水调蓄空间对维护区域水灾害安全和提升防洪能力具有重大意义。

2.3 水生态空间分布特征

将隐性和显性水生态空间矢量数据联合,得到临澧县的水生态空间范围。为降低破碎化影响,删除叠加图中的细小斑块(<0.1 hm²)(图 8)。

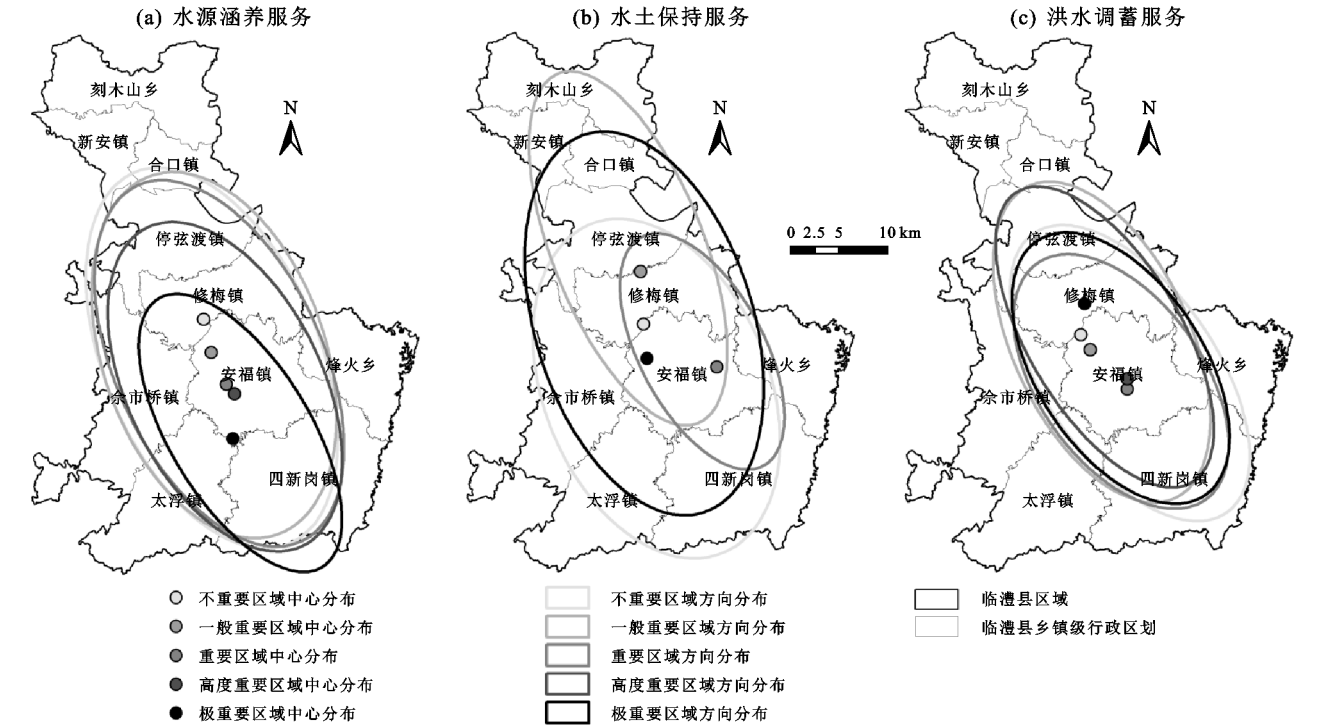


图 4 水生态系统服务各重要等级区地理中心及方向分布

表 8 水生态系统服务各重要等级区域标准差椭圆参数

单位:m

重要性程度及赋值	水源涵养服务			水土保持服务			洪水调蓄服务		
	短半轴	长半轴	长短半轴差	短半轴	长半轴	长短半轴差	短半轴	长半轴	长短半轴差
5 级(极重要)	7348.48	16476.22	9127.75	11415.04	20734.66	9319.61	8757.20	15963.20	7205.99
4 级(高度重要)	10202.90	18558.68	8355.78	/	/	/	7990.97	17753.44	9762.47
3 级(重要)	10867.53	20525.41	9657.88	6535.17	13567.24	7032.08	8580.92	15189.02	6608.09
2 级(一般重要)	11640.07	19921.70	8281.63	7928.14	19714.04	11785.90	9275.15	18046.96	8771.81
1 级(不重要)	11300.24	21074.71	9774.47	11794.74	18553.92	6759.18	9049.77	17764.31	8714.54

注:椭圆的长半轴表示区域的分布方向,短半轴表示区域的分布范围,长短半轴值差距越大,表示区域方向性越明显;反之,如果长短半轴越接近,表示方向性越不明显;长半轴越长,表明区域分布的离散程度越大,反之越集中。

2.3.1 水生态空间平面上的分布规律 水生态空间面积为 60 184.08 hm²,占临澧县总面积的 49.99%,少于显、隐性水生态空间面积之和 65 864.07 hm²,且两者的面积之差为 5 679.99 hm²,与显性水生态空间的面积

5 700.24 hm²基本等同。删除细小斑块后的水生态空间面积为 59 990.58 hm²,占总面积的 49.82%。

水生态空间地理中心分布于安福镇,有相对集中的区域,但整体较为离散,各乡镇均有不同程度分布。

大斑块集中分布于道水及澧水两大过境水系及其支流周边区域,西北部的刻木山国家石漠公园、中部的道水河国家湿地公园、西南部的太浮山风景名胜區也存在少量块状分布,中小型水库及其周边等区域呈小斑块分布。这些区域与河湖联系密切,是维护地区水生态安全的重要组成。

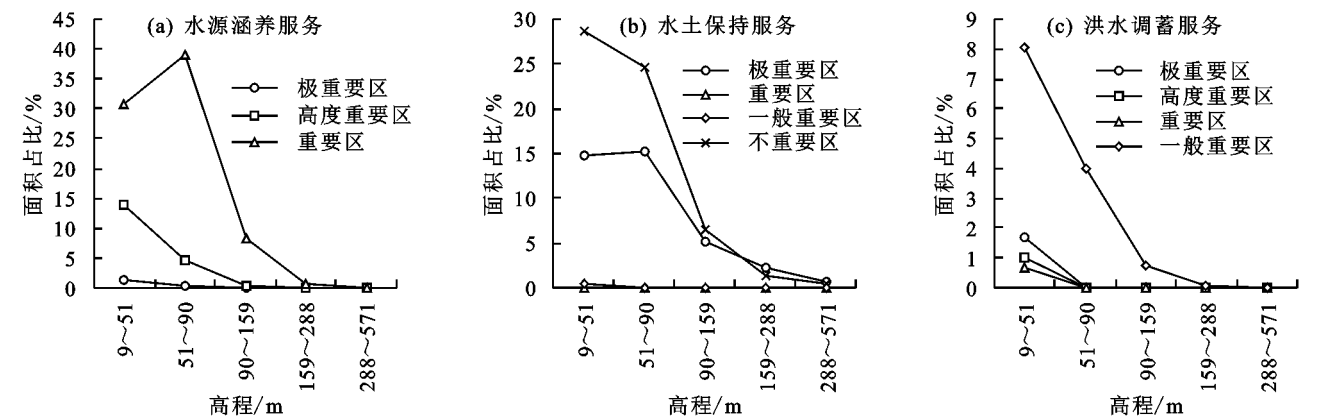


图 5 不同高程范围内各重要等级区面积占比

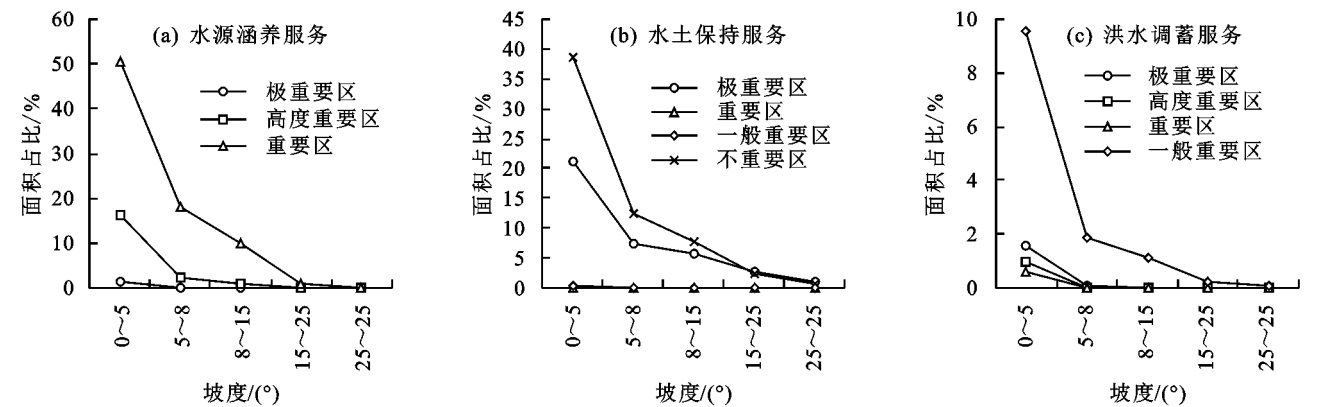


图 6 不同坡度范围内各重要等级区面积占比

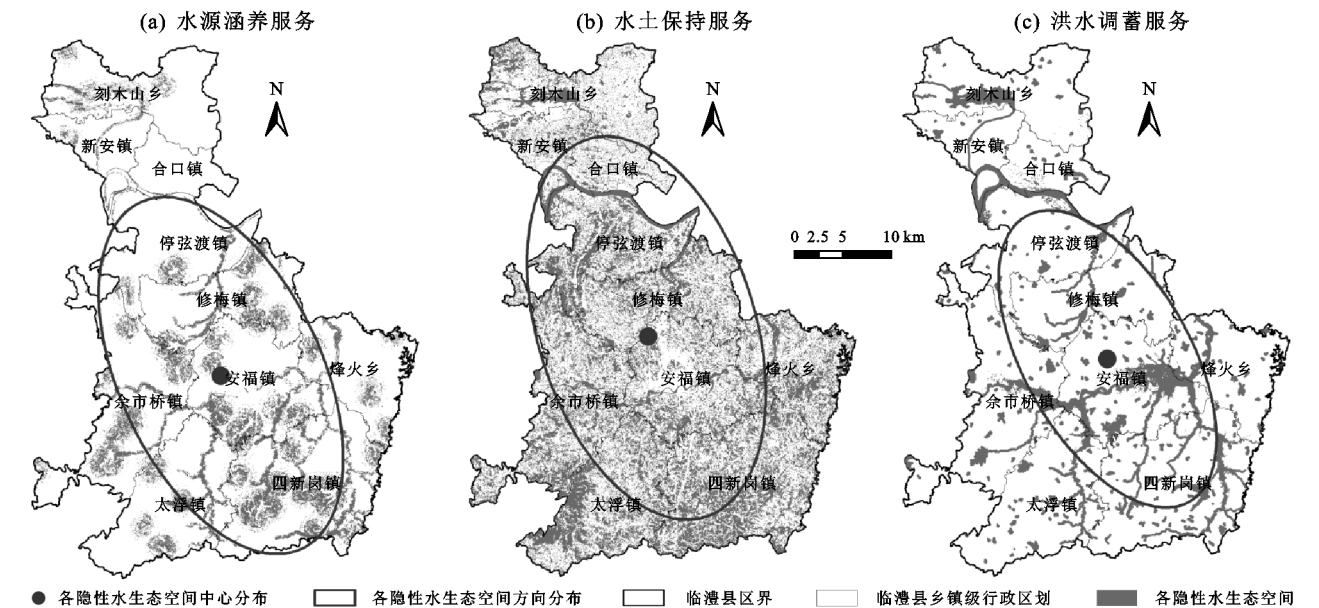


图 7 各隐性水生态空间分布

2.3.2 水生态空间立体上的分布规律 各高程及坡度范围都存在水生态空间,主要分布在高程 9~90 m,坡度 0~8°。水生态空间面积随着高程及坡度的增加而减少(表 9),表明水生态空间一般处于较低海拔、较缓坡及地形起伏度更小的地区,符合现实情况。

2.4 土地利用现状与水生态空间的关系 将临澧县土地利用 1 级分类矢量数据与水生态空间矢量数据相交(图 9),通过分析土地利用类型在水生态空间中的分布情况来评价土地利用现状。统计相关数据,得到临澧县水生态空间范围的土地利用

类型面积及占比柱状图(图 10)。

水生态空间在 高程上的面积变化			水生态空间在 坡度上的面积变化		
高程/m	面积/hm ²	占比/%	坡度/(°)	面积/hm ²	占比/%
9~51	25468.92	42.47	0~5	35651.07	59.45
51~90	23668.56	39.46	5~8	11437.92	19.07
90~159	7178.31	11.97	8~15	8368.38	13.95
159~288	2838.60	4.73	15~25	3390.21	5.65
288~571	820.80	1.37	25~50	1127.61	1.88

林地、水域是水生态空间的主要生态用地类型，面积分别是 26 629.11,12 707.37 hm²，所占比例分别为 44.40%，21.19%；而耕地和建设用地 2 种非生态用地类型面积分别为 17 675.91,2 862.9 hm²，所占比例分别为 29.47%，4.77%；水生态空间内草地和未利用地面积较小，面积分别是 96.99,3.24 hm²，所占比例分别是 0.16%，0.01%。水生态空间与建设用地及耕地等人类开发活动强的非生态用地类型存在一定的集聚及重叠空间。其中，与耕地的重叠区域最多，主要位于澧水、道水及其支流周边区域的农田，与建设用地的重叠区域相对较少，不存在明显的集中分布范围。

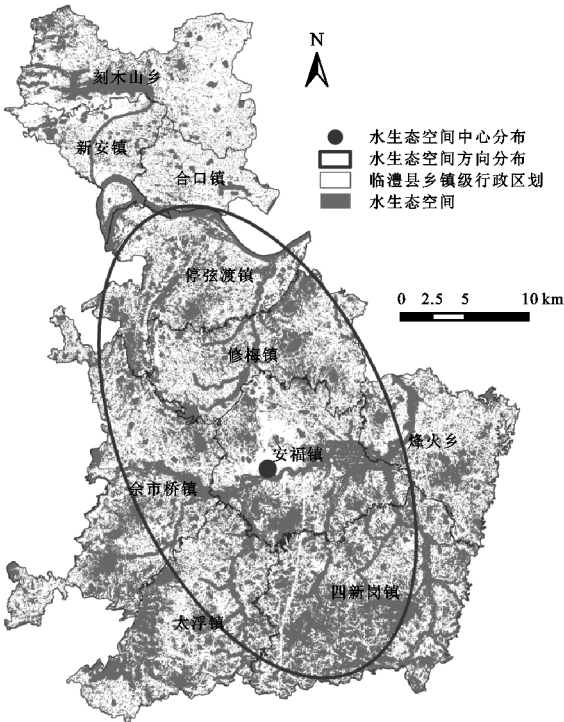


图 8 水生态空间分布

3 讨论

3.1 水生态空间识别方式

显性水生态空间一般可通过土地利用和遥感影像数据获取，隐性水生态空间则需结合其他相关因子，在显性水生态空间识别的基础上进一步分析。以

往学者^[17]多侧重于研究直观的显性水生态空间，且仅在景观格局或生态空间相关研究中提及，缺少单独以水生态空间识别为主题的研究。文中将区域水生态过程统一纳入辨识方法中，尝试从栅格的尺度评价出隐性水生态空间，同时，为更加直观地揭示各水生态空间分布特征，采用“中位数中心”及“标准差椭圆”对各水生态空间进行科学定量的分析，这对构建基于水生态安全的土地利用格局和水生态空间管控有较大的参考意义。但有关高精度的数据获取存在难度，如 NPP 指数评估法中的多年净初级生产力均值和土壤渗流能力因子等^[6]。因此，如何丰富数据源，提高数据精度，完善水生态空间识别方法还需深入研究，以便未来更精准的识别区域隐性水生态空间并借助不同的方法验证识别结果的准确性。

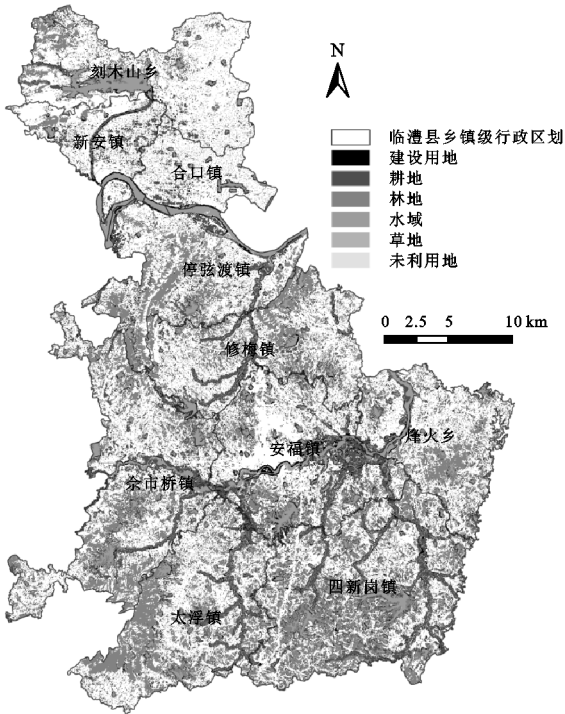


图 9 水生态空间范围内土地利用类型

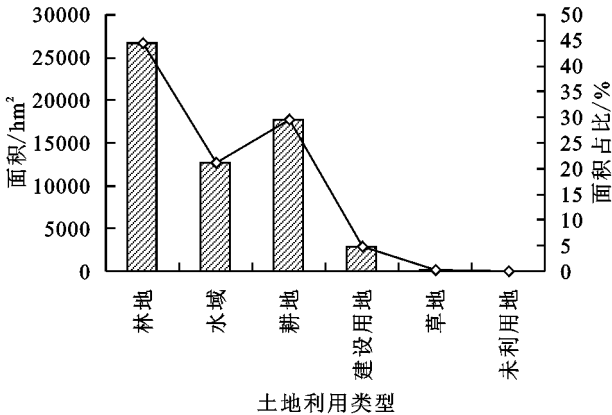


图 10 水生态空间范围内土地利用类型面积及占比

3.2 水生态空间分布及数量特征

本研究采用自然断点分级法将水源涵养服务评

价结果分为 5 个等级,该方法基于数据中固有的自然分组识别分类间隔,可最恰当的对相似值进行分组,并使各类之间的差异最大化^[24],因此,水源涵养服务各重要等级区域面积占比相差较大。随着重要等级的提高,水土保持服务各等级区域面积先减后增,呈现 2 个极端,原因是临澧县局部采矿严重,导致地表裸露,水土侵蚀强度极大,但部分区域具有很高的植被覆盖度,可保持水土。隐性水生态空间的面积少于水源涵养、水土保持、洪水调蓄 3 个空间的面积总和,水生态空间的面积少于显、隐性水生态空间的面积总和,说明各水生态空间之间存在重叠区域,且隐性水生态空间基本涵盖了显性水生态空间,可能是由于各水生态空间识别过程中使用了相同的评价因子。值得注意的是,这些交叉部分可否成为水生态治理的关键,例如,洪水调蓄空间的洪水能否转化为水资源。

各隐性水生态空间均呈现“小集中,大分散”的特征,其中,水源涵养和洪水调蓄空间分布特征较为相似,主要分布于地表水资源丰富且地势较低的区域,由于两者都受河湖缓冲区距离的影响,且水源涵养服务影响地域对雨洪灾害的防御能力。最终,整合的水生态空间相对集中,主要分布于西北部刻木山国家石漠公园、中部道水河国家湿地公园、西南部太浮山省级风景名胜区和澧水涵养区,与临澧县生态现状无明显冲突,表明本研究构建的体系可应用于县域尺度。但由于本研究只分析了 1 期数据,未探究水生态空间的时空演变特征,因此,不能更深入地了解所得格局的内部驱动因素。在今后的研究中希望能够结合多期数据探求水生态空间时空动态变化规律,进而更好地揭示影响水生态空间分布的原因,并基于此规律科学地预测未来水生态空间分布情况^[8]。

3.3 临澧县土地利用现状与水生态空间的冲突分析

水生态空间内存在较多耕地和建设用地等人类活动强烈的非生态用地类型,表明临澧县土地利用现状与水生态空间存在冲突。其中,水生态空间与耕地的冲突较为明显,呈现此结果的原因是临澧县属于国家级农产品主产区,农业生产建设较多,导致耕地对水生态空间的占用较严重。综合多数与土地利用冲突相关的研究^[5-6]发现,生态空间均存在不同程度的被占用情况,因此,如何解决土地利用与水生态空间的冲突需得到关注。与此同时,从侧面印证了通过方法识别的水生态空间不可避免的存在耕地和建设用地等人类活动强烈的非生态用地类型,既不利于区域水生态安全,也不利于环境的可持续发展。为使得水生态空间划分结果具有实际落地性,可结合更高精度

土地利用数据和体现地区社会经济发展需求的数据,进一步揭示冲突的驱动力,重新规划水生态空间中非生态用地类型。

3.4 展望

本研究构建了水生态空间分类体系,辨识了显性和隐性水生态空间,并探究了水生态空间与土地利用的关系,目的是为水生态空间的规划提供科学依据,使重新规划后的水生态空间更具有调控洪涝灾害等水生态问题的能力。主要基于土地利用现状与水生态空间的冲突分析提出建议:(1)通过退耕还林、还草和水土保持等工程,将水生态空间中的部分耕地和未利用地等转变为林地或草地;(2)严格制止建设用地扩张对水生态空间的占用,逐步退出影响水生态环境的开发建设活动;(3)尝试将土地利用现状与水生态空间冲突分析结果应用于空间优化模拟中,模拟未来水生态空间分布状态,及时制止水生态空间被进一步占据;(4)将明确冲突后的水生态空间进一步划分为水生态空间保护区、水生态空间控制区和水生态空间缓冲区,并依据区域的不同特征制定相应的分区指引,以便更好地保护区域水生态环境,构建区域水生态安全格局,为国土空间规划相关专题提供参考。

4 结论

(1)显性水生态空间包括河渠、水库、坑塘、滩地等地表水域,共占临澧县总面积的 4.73%,整体分布较离散,主要处于低海拔、较缓坡区。

(2)隐性水生态空间占临澧县总面积的 49.97%,少于水源涵养、水土保持及洪水调蓄空间面积占比之和 69.68%,说明各隐性水生态空间之间存在交叉部分,且它们均呈现“小集中,大分散”的特征。

(3)水生态空间占临澧县总面积的 49.99%,少于显、隐性水生态空间的面积占比总和 54.70%,表明识别的显、隐性水生态空间存在重叠区域,且隐性水生态空间基本涵盖了显性水生态空间。

(4)水生态空间中的耕地和建设用地所占比例分别为 44.40%,21.19%,表明水生态空间与建设用地、耕地等人类活动强烈的土地利用类型存在冲突。

总体而言,各水生态空间识别结果较好地反映了维护区域水生态安全的空间分布特征,是维护地区水生态安全的重要组成,需得到重点修复及保护;土地利用现状与水生态空间存在冲突的结果,印证了识别的水生态空间不可避免地存在耕地和建设用地等人类活动强烈的非生态用地类型,后期可重新规划水生态空间中的非生态用地类型,以期高效保护水生态空间和规避水生态安全问题。

参考文献:

[1] 俞孔坚,王春连,李迪华,等.水生态空间红线概念、划定方法及实证研究[J].生态学报,2019,39(16):5911-5921.

[2] 常君雪,帅红.洞庭湖生态经济区典型城市生态空间识别研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(1):30-40.

[3] 张亮,岳文泽.城市生态空间多元综合识别研究:以杭州市为例[J].生态学报,2019,39(17):6460-6468.

[4] 迟妍妍,许开鹏,王晶晶,等.京津冀地区生态空间识别研究[J].生态学报,2018,38(23):8555-8563.

[5] 谢花林,姚干,何亚芬,等.基于 GIS 的关键性生态空间辨识:以鄱阳湖生态经济区为例[J].生态学报,2018,38(16):5926-5937.

[6] 潘方杰,王宏志,宋明洁,等.基于 GIS 的国家重点生态功能区生态空间识别研究:以湖北长阳县为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(4):658-669.

[7] 费建波,夏建国,胡佳,等.南方传统农区乡村生态空间时空演变分析[J].农业机械学报,2020,51(2):143-152.

[8] 王旭,马伯文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.

[9] 刘伟,杨晴,张梦然,等.构建以流域为基础的水生态空间管控体系研究[J].中国水利,2018(5):27-31.

[10] 任俊霖,李浩,伍新木,等.基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J].长江流域资源与环境,2016,25(10):1537-1544.

[11] 郭书海,吴波.水生态功能区划流程:双关系树框架与概念模型[J].应用生态学报,2017,28(12):4051-4056.

[12] Benra F, De Frutos A, Gaglio M, et al. Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions[J].Environmental Modelling and Software,2021,138:e104982.

[13] Grizzetti B, Liquele C, Antunes P, et al. Ecosystem services for water policy: Insights across Europe[J]. Environmental Science and Policy,2016,66:179-190.

[14] 邓伟,严登华,何岩,等.流域水生态空间研究[J].水科学进展,2004,15(3):341-345.

[15] 刘明,王克林.洞庭湖流域中上游地区景观格局变化及其驱动力[J].应用生态学报,2008,19(6):1317-1324.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 21010—1017,土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.

[17] 张合兵,于壮,邵河顺.基于多源数据的自然生态空间分类体系构建及其识别[J].中国土地科学,2018,32(12):24-33.

[18] 黎秋杉,卡比力江·吾买尔,小出治.基于水基底识别的水生态安全格局研究:以都江堰市为例[J].地理信息世界,2019,26(6):14-20.

[19] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J].水土保持学报,2020,34(4):217-223.

[20] 宋明晓.基于 3S 技术的辽河流域(吉林省段)景观格局演变及关键性生态空间辨识研究[D].长春:吉林大学,2017.

[21] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.

[22] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.

[23] 王森.徐州市水生态安全格局构建[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2018.

[24] 朱立晨,王豪伟,唐立娜.闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布[J].生态学报,2018,38(20):7254-7268.

[25] 曹慧明,董仁才,邓红兵,等.区域生态系统重心指标的概念与应用[J].生态学报,2016,36(12):3639-3645.