

DOI: 10.5846/stxb202009292518

王飞儿, 郑思远, 杨泓蕊, 俞洁, 王一旭, 王浙明. 基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控. 生态学报, 2022, 42(2): 539-548.

Wang F E, Zheng S Y, Yang H R, Yu J, Wang Y X, Wang Z M. Regionalization and classification of water eco-environment in Zhejiang Province based on ecosystem service. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 539-548.

基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控

王飞儿^{1,*}, 郑思远¹, 杨泓蕊¹, 俞洁², 王一旭¹, 王浙明³

¹ 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

² 浙江省环境监测中心, 杭州 310012

³ 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007

摘要:水环境综合管理被普遍认为是促进流域可持续发展的基本手段。生态系统服务是生态系统对人类福祉和生存的直接和间接贡献,是维持与影响流域水生态环境的重要因素。随着流域空间管控日益受到重视,基于生态特征的“分区分类”管控已成为流域精细化管理的重要内容。论文基于生态系统服务功能与水质关联性,采用典型对应分析(CCA)选取了土壤类型、土地利用、归一化植被指数和人口密度等4种生态特征作为水生态功能分区指标。结合流域生态特征、汇水区域和行政管理单元的空间分布,通过聚类分析及空间叠置法,将浙江省划分了10个水生态功能区和510个水环境控制单元。采用当量因子法对各控制单元的生态系统服务价值进行系统评估。结果表明2015年浙江省生态系统服务总价值为5123.7亿元,其中控制单元的生态系统服务价值范围为59.8—136.5亿元。利用K-means聚类方法得到了4类生态服务簇,并探讨了各类生态服务簇的服务类型、空间分布特征以及与各单元水质的关系。研究结果表明,I类簇主要分布在西部及西南部的山地丘陵区,其面积占了全省面积的52.68%;II类簇的占地面积最小但水域面积相对较高,主要覆盖千岛湖和钱塘江河口;III类簇分布相对分散,主要分布在丘陵平原地区;而IV类簇主要分布在城镇较集中的平原地区。不同生态服务簇的主要生态服务类型存在明显差异,如I类簇以原料生产、水土保持、生物多样性保护、气体调节和气候调节为主;II类簇的主要生态服务类型为调节功能,包括气体调节、水文调节和废物处理;III类簇和IV类簇以食物生产为主要的生态服务类型。水质特征与生态服务功能密切相关,生态服务价值越高,水体水质越好。因此根据各个生态服务簇的水质特征,将各类生态服务簇划分为保护、维持、改善、整治4种类型,并提出了不同生态服务簇内水环境控制单元的差异化管控措施,以推进浙江省水生态环境的差异化管理。

关键词:水生态功能区;控制单元;生态服务;聚类分析;分区分类

Regionalization and classification of water eco-environment in Zhejiang Province based on ecosystem service

WANG Feier^{1,*}, ZHENG Siyuan¹, YANG Hongrui¹, YU Jie², WANG Yixu¹, WANG Zheming³

¹ College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

² Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, China

³ Environmental Science Research & Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China

Abstract: Integrated water environmental management has been world widely treated as a fundamental means to support sustainable watershed development. Ecosystem Services (ESs), which refer to the direct and indirect contributions of ecosystems to human well-being and subsistence, are important factors for water quality maintenance and improvement. With increasing attention paid to the spatial management and control, “zoning classification” based on the ecosystem characteristics has become an important content of integrated watershed management. Based on the relationships between

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208-009)

收稿日期:2020-09-29; 网络出版日期:2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangfeier@zju.edu.cn

ecosystem characteristics and water quality, four ecological features including soil type, land usage, normalized vegetation index and population density were selected for aquatic ecoregion zoning using canonical correspondence analysis (CCA). Combining the spatial distribution of ecological features, catchments and administrative management units, Zhejiang Province was divided into ten aquatic ecoregions and 510 water environmental control units through cluster analysis and spatial overlap. The ES value of each unit was evaluated with the method of equivalent factor. The results showed that in 2015, the total ES value in Zhejiang Province reached 512.37 billion RMB, and those of individual units ranged from 5.98 to 13.65 billion RMB. Four ES bundles were obtained by K-means clustering method, and the service types and spatial distribution characteristics of the bundles were analyzed. Subsequently, the relationships between water quality and ecosystem services were analyzed for each unit. The results showed that Bundle I covered most of the mountain and hilly areas mainly located in the west and southwest, accounting for 52.68% of the province's total area, while Bundle II had the smallest area but a relatively high water occupation ratio, mainly covering the Qiandao Lake and the estuary of the Qiantang River. Bundle III was distributed relatively scattered, mostly in hilly and plain areas, while Bundle IV was primarily distributed in plain areas where cities and towns were located. The dominant ESs varied significantly in different ES bundles. For example, ESs such as raw material production, soil conservation, biodiversity protection, gas regulation, and climate regulation dominated in the Bundle I, while the regulatory services were the dominant ESs in Bundle II, including gas regulation, water regulation and waste treatment. Food production contributed significantly to both Bundles III and IV. The results also indicated that the characteristics of water quality are closely related to the ecological service, i.e., the higher the ES value, the better the water quality. As a result, the units were classified into four types, including protection, maintenance, improvement and remediation according to the characteristics of the water quality of each ES bundle. The differentiated water quality control and improvement approaches were proposed for the units in the four types of ES bundle, to support the water eco-environment management of Zhejiang Province.

Key Words: aquatic ecoregion; control unit; ecosystem service; cluster analysis; regionalization and classification

实施“分区、分类、分级、分期”的水生态环境管控是流域精细化管理的主流思想^[1-2]。国务院 2015 年发布的《水污染防治行动计划》明确提出了“研究建立流域水生态环境功能分区管理体系”,并提出对全国重点流域进行分流域、分区域、分阶段的科学治理。“十三五”重点流域水污染防治规划也提出了“流域-控制区-控制单元”三级分区管理体系^[3]。“十四五”重点流域规划由水污染防治改为水生态环境保护,反映我国水环境管理在由总量控制向环境质量转型的基础上,进一步向水生态系统健康方向转变^[4]。因此随着流域空间管控思想的深入,开展水生态环境分区,明确不同区域水生态环境目标,制定差异化管控对策,将成为我国流域水生态环境精细化管理的核心内容之一^[5]。

根据不同的管理模式和划分依据,国内外关于水生态环境分区的类型及方法较多,包括水生态分区、水生态功能分区、水环境功能分区等。Omernik^[6]提出水生态区概念并采用地质、土壤、地形地貌、土地利用、植被、气候等指标体系完成了美国国家尺度和地方尺度的水生态分区;欧盟、新西兰等国家在 Omernik 指标的基础上开展了适合本国情况及管理目标的水生态区划^[7-8]。我国在流域水生态环境分区中,因为管理目标不同,形成的分区体系也各异。始于 20 世纪 90 年代的水环境功能分区结合区域水资源开发利用现状和社会需求,从污染物排放及水质影响等角度开展水体区划;“十一五”以来辽河、海河、太湖、滇池等一些重点流域开展了不同层级的水生态功能分区,通过识别流域水生态系统格局与功能的空间异质性特征,辨析水-陆生态系统的耦合关系,而将流域划分成若干个相对独立、完整单元^[9-12];另外,始于“九五”的流域水污染控制分区实践也逐渐得到发展,在“十三五”重点流域水污染控制规划中形成了“流域-区域-控制单元”的分区体系^[3]。但各类水生态环境分区在发展与应用过程中,仍存在较多的问题。如水环境功能区划依据用水功能以及水质类别进行划分,忽略了水陆协同性、水生态系统完整性;水生态功能区划将水生态系统完整性纳入划分依据,但未

与行政管理相结合导致分区未能真正落实到实际的管理中;“十三五”流域管控中划分的控制单元实现了从污染源到入河排污口到水体水质之间的响应,但是目前控制单元的划分忽略了水体的自然特征和生态特征。因此兼顾水生态保护与水污染控制管理目标,耦合现有的各类水生态环境分区,构建新的分区体系,将成为指导流域水生态环境管理的重要依据。

生态系统服务是人类直接或者间接从生态系统中获得的各种惠益,是衔接自然环境与人类需求的重要纽带^[13-15]。流域具有多种类型的生态系统服务功能,包括水文调节、水土保持、气候调节、废物处理等,直接或间接影响着流域水生态环境状态^[16]。随着流域管理从水资源保护、水污染控制向水资源水环境水生态综合管理转变^[1],将生态系统服务功能纳入流域管理,有助于流域水生态与水环境的协同。因此构建兼顾生态系统服务与水环境质量的流域水生态环境分区分类体系,在宏观尺度上把握水生态保护格局,在操作层面上落实水生态环境目标,推进流域水生态环境精细化管理。

本研究以浙江省八大水系为研究对象,基于流域生态特征与水环境响应,构建不同类型的分区指标体系及方法,划定水生态功能区和水环境控制单元,在对各控制单元的生态服务功能价值进行评估及聚类的基础上,提出各类生态服务簇内控制单元的水生态环境分类管控要求,为落实水环境质量底线、开展精细化的水生态环境管控提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浙江省位于长江三角洲南翼,地势由西南向东北倾斜,地形复杂,以山地丘陵为主,陆域总面积 10.43 万 km²。属亚热带季风性湿润气候,年平均气温在 15—18℃ 之间,年均降水量在 1100—2000 mm 之间。境内拥有钱塘江、甬江、椒江、甬江、苕溪、运河、飞云江、鳌江等八大水系。浙江省人口密度高,经济发展较快,水环境压力较大。虽然近年来开展的各类治水行动使浙江的水环境得到较大的改善,但局部区域仍存在污染物排放量大、强度高,水质不能全面稳定达标、水环境管理短板未补齐、水生态管理缺乏足够重视等问题。

1.2 研究方法

1.2.1 水生态环境分区

水生态环境分区包括水生态功能分区及水环境控制单元,其中水生态功能区划综合考虑了水生态系统空间格局,是水环境控制单元划定的基础,其生态目标要通过水环境控制单元去落实;水环境控制单元是落实水生态水环境目标的具体操作单元。本研究采用自上而下的划分思路,根据流域生态系统特征划定水生态功能区,在此基础上进一步耦合流域汇水单元、行政管理单元以及水(环境)功能区,开展水环境控制单元的划分,形成水生态功能区-水环境控制单元的多层级水生态环境分区体系,有效落实水生态环境目标及差异化管控对策。

(1) 水生态功能分区

水生态功能区的划分指标主要考虑能反映流域生态系统特征差异性指标,包括降雨、气温、地形、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖类型、归一化植被指数(NDVI)、人口密度等。基于 CANOCO 软件,将各生态因子与水质数据进行典范对应分析(CCA)^[17]。根据生态因子和水质的 CCA 分析(图 1)筛选了土地利用、土壤类型、NDVI 和人口密度作为体现流域水生态系统空间格局的指标。其中土地利用类型体现了自然环境与人类活动的综合影响;土壤类型决定了土壤不同的渗透性和持水能力;植被覆盖类型和 NDVI 指数反映了物质的迁移转化对水生态系统异质性的影响;人口密度则反映了潜在污染负荷对水生态系统的影响^[18-19]。

依据 CCA 分析筛选出的与水质相关的指标,采用 ISODATA 非监督空间聚类方法^[20],划定水生态功能区。

(2) 水环境控制单元划分

按照水系完整性、行政管理可操作性以及污染传输封闭性原则开展水环境控制单元划分。采用 ArcGIS

的 Hydrology 模块,利用浙江省数字高程数据 (DEM) 提取全省水系,以 5000 为划分阈值,结合实际水系修正得到 389 个汇水区。在 ArcGIS 平台采用空间叠置分析,将水生态功能分区、389 个汇水区以及 1386 个乡镇边界进行叠加。控制单元初步划分基本思路如下:1) 一个水生态功能区包括多个完整的控制单元;2) 山地丘陵区汇水特征明显的以汇水区边界作为控制单元边界,将汇入同一水体的陆域包括在一个控制单元内;3) 平原河网区难以确定水文以及污染物传输空间边界的地区,则以行政边界作为控制单元的边界;4) 控制单元不能跨县界,否则以县界进行切分。在初步划定水环境控制单元后,利用水环境功能区对控制单元的初始边界进行修正或分割,确保同一水环境功能区尽可能在同一控制单元内。

1.2.2 水生态环境分类管控

为实现水环境水生态协同管理,以水环境控制单元的生态系统服务空间差异为主导,基于控制单元的生态特征和水质特征对控制单元进行分类,落实差异化的管控措施。

(1) 生态服务价值评估

由于生态系统服务的各物理量很难进行直接比对,因此将各类生态服务货币化,采用生态服务价值开展评估。各控制单元的生态服务价值采用谢高地等人提出的当量因子法进行估算^[21-22]。根据相关资料,2015 年浙江省粮食单位产出量均值为 5886 kg/hm²^[23],国家粮食和物资储备局公布当年稻谷平均最低收购价 2.7 元/kg^[24]。采用粮食产量与当年粮食价格进行修正,得到研究区域一个当量因子为 2270 元/hm²。根据不同类型生态系统单位面积的产品种类、数量及相应价格,得到代表全省不同生态系统单位面积生态服务功能价值的当量因子(表 1)。

表 1 浙江省不同生态系统单位面积生态系统服务价值

Table 1 Equivalent value per unit area of ecosystem services in Zhejiang province

服务功能类型 Service function type	服务功能 Service function	生态服务价值 Ecological service value /(万元 km ⁻² a ⁻¹)					
		森林	草地	农田	水体	未利用地	建设用地
供给服务	食物生产	7.49	9.76	22.7	12.03	0.45	0
Supply service	原材料生产	67.65	8.17	8.85	7.95	0.91	0
调节服务	气体调节	98.06	34.05	16.34	11.58	1.36	0
Regulating service	气候调节	92.39	35.41	22.02	46.76	2.95	0
	水文调节	92.84	34.5	17.48	426.08	1.59	0
	废物处理	39.04	29.96	31.55	337.1	5.9	0
支持服务	保持土壤	91.25	50.85	33.37	9.31	3.86	0
Support service	维持生物多样性	102.38	42.45	23.15	77.86	9.08	0
文化服务	提供美学景观	47.22	19.75	3.86	100.79	5.45	0
Cultural service							
合计 Total		638.32	264.91	179.33	1029.45	31.55	0

以水环境控制单元为评估单元,根据各控制单元内各类生态系统面积及当量因子,计算各单元的生态服务价值:

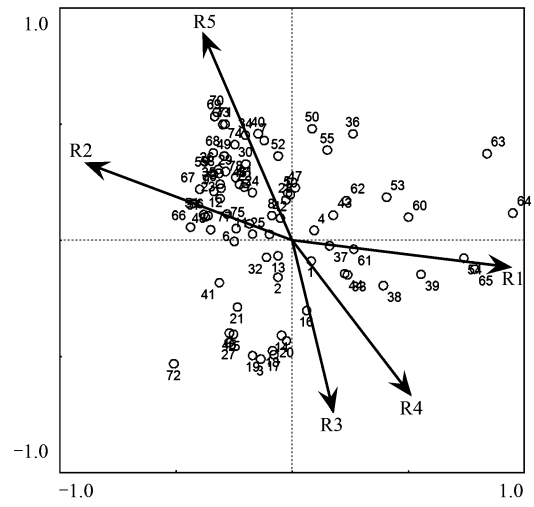


图 1 生态因子与水质 CCA 分析结果

Fig. 1 The result of CCA analysis on ecological factors and water quality

CCA, 典范对应分析 Canonical Correspondence Analysis; R1, 环境因子 1 Environmental factor 1; R2, 环境因子 2 Environmental factor 2; R3, 环境因子 3 Environmental factor 3; R4, 环境因子 4 Environmental factor 4; R5, 环境因子 5 Environmental factor 5

$$ESV = \sum_{i=1}^n S_i \times EF_i$$

式中, ESV 为生态服务价值(万元/a); S_i 为第 i 类生态系统的面积(km^2); EF_i 为第 i 类生态系统的当量因子(万元· km^2 · a^{-1})。

由于同一种土地利用类型通常采用相同的当量因子,但不同的环境条件也会影响具有相同利用类型土地的生态服务价值^[25],故需要对当量因子进行适当的修正。本研究中生态服务价值确定是基于生态系统的生产能力,而生物量是表征生态系统初级生产能力的重要因子,可以在一定程度上反映不同区域之间生态服务功能的差异^[26-27]。基于归一化植被指数($NDVI$)可用于表征植被类型和数量^[28],故利用 $NDVI$ 对各个控制单元内的林地、耕地、草地的生态服务价值当量因子进行空间修正:

$$\omega = \frac{NDVI_j}{\frac{1}{k} \sum NDVI_j}$$

式中, ω 为各管控分区空间修正因子, $NDVI_j$ 表示第 j 控制单元的归一化植被指数, k 表示控制单元总数。

(2) 生态系统服务簇分类

生态系统服务簇是指在时间与空间上反复出现的一组生态服务功能^[29-30]。通过对不同区域内生态服务功能的聚类,得到生态服务功能比较一致的生态系统服务簇,依据各个簇内的主导生态服务功能类型进行差异化管理。本文利用 SPSS 软件,以 9 种生态服务功能为变量,以各水环境控制单元为评估单元,根据各类生态服务功能价值,采用 K 均值聚类法开展水环境控制单元生态系统服务簇及其主导生态服务功能的识别。同时解析各生态服务簇的水质特征,确定各类簇水环境控制单元的管控目标和差异化管控要求。

1.3 数据来源

浙江省数字高程数据(30 m-DEM),2015 年浙江省土地利用类型、土壤类型、植被类型、 $NDVI$ 指数和人口密度数据分辨率为 1 $\text{km} \times 1 \text{ km}$,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);乡镇级行政区划、水系分布来源于浙江省测绘与地理信息局;水(环境)功能区划和 2015 年的环境数据来自浙江省生态环境厅;2015 年省控断面的水质数据来源于浙江省环境监测中心。

2 结果与讨论

2.1 水生态环境区划

(1) 水生态功能分区

浙江省水生态功能区主要体现自然环境和人类活动对水生态系统的叠加影响。根据土壤类型、土地利用、植被以及人口密度的空间差异性,采用 ISODATA 空间聚类共得到 10 个浙江省水生态功能区,具体见图 2。

根据分区结果,Ⅲ2 区、Ⅲ3 区和Ⅳ2 区的人口密度较高,人类活动的影响较大,人工植被、耕地、人为土的占比较高;Ⅰ2 区、Ⅱ2 区、Ⅲ1 区、Ⅲ4 区和Ⅳ1 区的人口密度中等,较好地体现了自然环境因素和人为活动因素的复合影响,植被类型主要包括人工植被和阔叶林、针叶林等自然植被,林地和耕地两种土地利用类型占比相当;Ⅰ1 区和Ⅱ1 区的人口密度较低,受自然环境因素的影响较大,土地利用类型以林地为主导, $NDVI$ 指数也较高。十个水生态功能区中,面积最大的是中部盆地水生态功能区(Ⅱ2 区),区域面积为 25777.9 km^2 ,面积

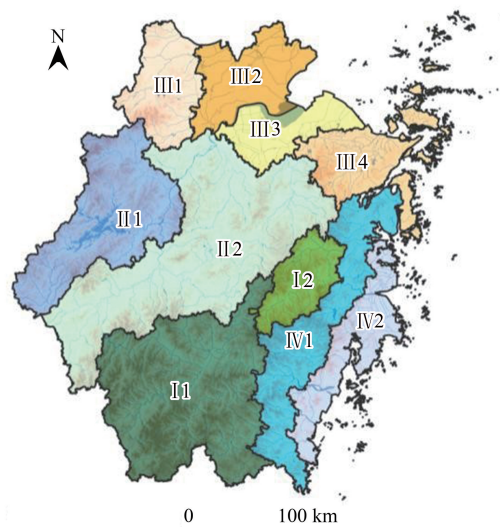


图 2 浙江省水生态功能分区

Fig.2 Regionalization of aquatic ecoregions function in Zhejiang Province

I—IV 为水生态分区编号,1—4 为水生态功能分区编号

最小的是中部丘陵水生态功能区(I2区),为4354.0 km²。

(2) 水环境控制单元

在水生态功能区划基础上,耦合流域汇水区、乡镇边界(含县市区边界),采用空间叠置方法进行分区,同时根据水环境功能区划对各控制单元边界进行修正,得到510个水环境控制单元,见图3。

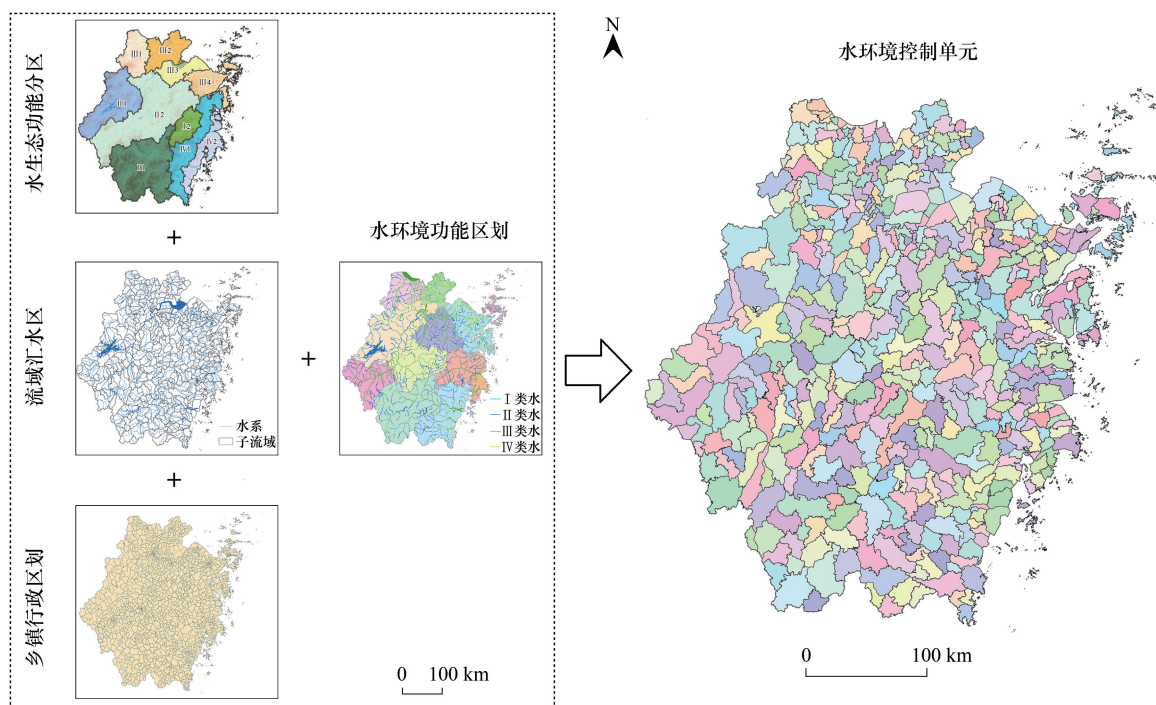


图3 浙江省水环境控制单元划分

Fig.3 Water environment control units in Zhejiang Province

510个控制单元平均面积205 km²,最大和最小控制单元的面积分别为924.10 km²和13.06 km²。从各水生态功能区分布来看(表2,中部盆地水生态功能区的控制单元最多,共有107个,而中部丘陵水生态功能区的控制单元最少,仅19个;从行政分区来看(表2,杭州、宁波和台州的控制单元较多,分别为69个、66个和64个,而舟山市最小,仅有6个控制单元;从空间位置来看,上游山地区控制单元划分较为稀疏,而下游平原区控制单元划分则较为密集。

2.2 水生态环境特征识别

(1) 生态服务功能特征识别

根据各控制单元的土地利用类型开展生态服务价值评估。结果显示,全省生态服务价值总计为5123.73亿元/a。各控制单元的生态服务价值在136.53—59.87亿元/a之间波动,各控制单元单位面积的生态服务价值为6.50—818.45万元/km²,生态服务价值在空间分布上整体呈现西高东低、南高北低的趋势(图4)。

以保持各簇的完整性及不同簇别间的空间异质性为原则,采用K均值聚类,最终确定了4类生态系统服务簇(图4)。I类簇的区域面积最大,占全省总面积的52.68%,主要分布在西部丘陵山地区和西南山区,土地利用类型以林地为主,单位面积生态服务价值高,总生态服务价值占全省总生态服务价值的65.46%;II类簇面积最小,主要分布在千岛湖以及钱塘江入海口,水域占比较大,总生态服务价值占全省总生态服务价值的2.02%,但单位面积服务价值较高;III类簇主要分布于低山丘陵区,土地利用类型以林地(山地区)和耕地(平原区)为主,人类活动相对频繁,单位面积生态服务价值相对较高,总生态服务价值占全省总生态服务价值的26.43%;IV类簇集中分布在北部平原、中部金衢盆地和东南沿海平原。该类簇城镇用地比重也较大,是城镇

集聚区,单位面积生态服务价值相对较小,区域总服务价值占全省的 6.09%。

表 2 水环境控制单元区域分布
Table 2 The distribution of water environment control units

水生态功能区 Aquatic ecoregions	控制单元个数 Number of control units	面积 Area/km ²	地市 City	控制单元个数 Number of control units	面积 Area/10 ⁴ km ²
I 1/南部山区水生态功能区 Southern mountainous region	61	19962.5	杭州	69	1.73
I 2/中部丘陵水生态功能区 Central hilly region	19	4354.0	宁波	66	0.93
II 1/西部山区水生态功能区 Western mountainous region	30	12682.7	温州	53	1.20
II 2/中部盆地水生态功能区 Central basin area	107	25777.9	绍兴	51	0.84
III 1/西北丘陵水生态功能区 Northwest hilly region	42	6042.6	嘉兴	38	0.43
III 2/北部平原水生态功能区 Northern Plain region	65	6596.9	湖州	42	0.58
III 3/东北平原水生态功能区 Northeast plain region	38	4698.2	金华	39	0.99
III 4/东部平原水生态功能区 Eastern plain region	48	6951.9	衢州	31	0.90
IV 1/东部丘陵水生态功能区 Eastern hilly region	51	10517.3	台州	64	1.00
IV 2/东南平原水生态功能区 Southeast plain region	49	6585.7	丽水	51	1.70
			舟山	6	0.13
小计	510	10.43	小计	510	10.43

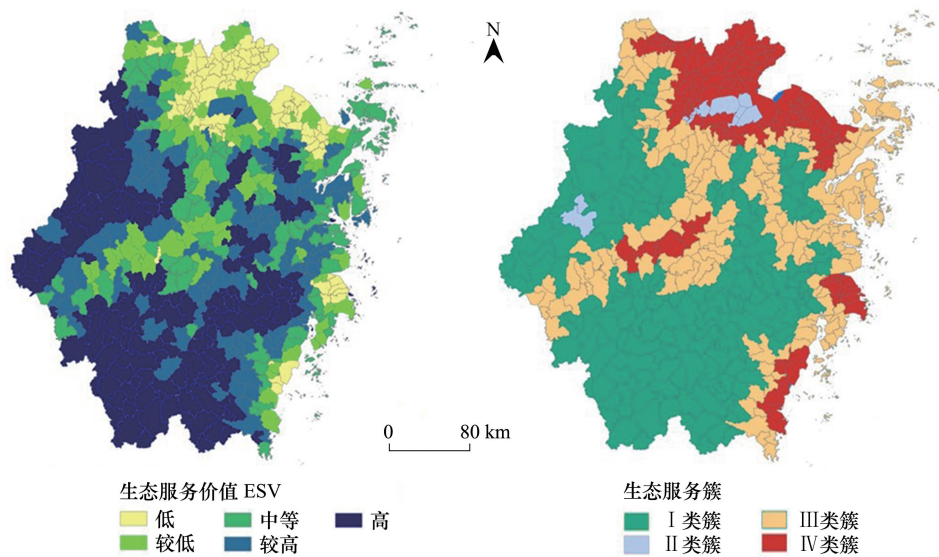


图 4 浙江省生态服务功能空间分布特征
Fig.4 The spatial distribution characteristics of ecological service function in Zhejiang Province
ESV, 生态服务价值 Ecological service value

根据各生态服务簇的生态服务功能价值组成(图 5)可知,不同簇的主导生态服务功能存在一定的差异。

I类簇总生态服务价值较高,保持土壤、气体调节、气候调节、维持生物多样性和原材料生产等生态服务功能价值明显高于其它簇别,但食物生产服务功能相对较差。II类簇在废物处理、水文调节和提供美学景观方面具有相近的生态服务功能价值,且明显优于其它类型的生态服务功能。III类簇在保持土壤、气体调节、气候调节、食物生产、原材料生产等方面具有较高的生产服务功能价值,其中食物生产功能的生态服务价值最大。IV类簇的食物生产服务价值明显高于簇内其它类型以及其他簇的食物生产功能,是该簇的主导生态服务功能。

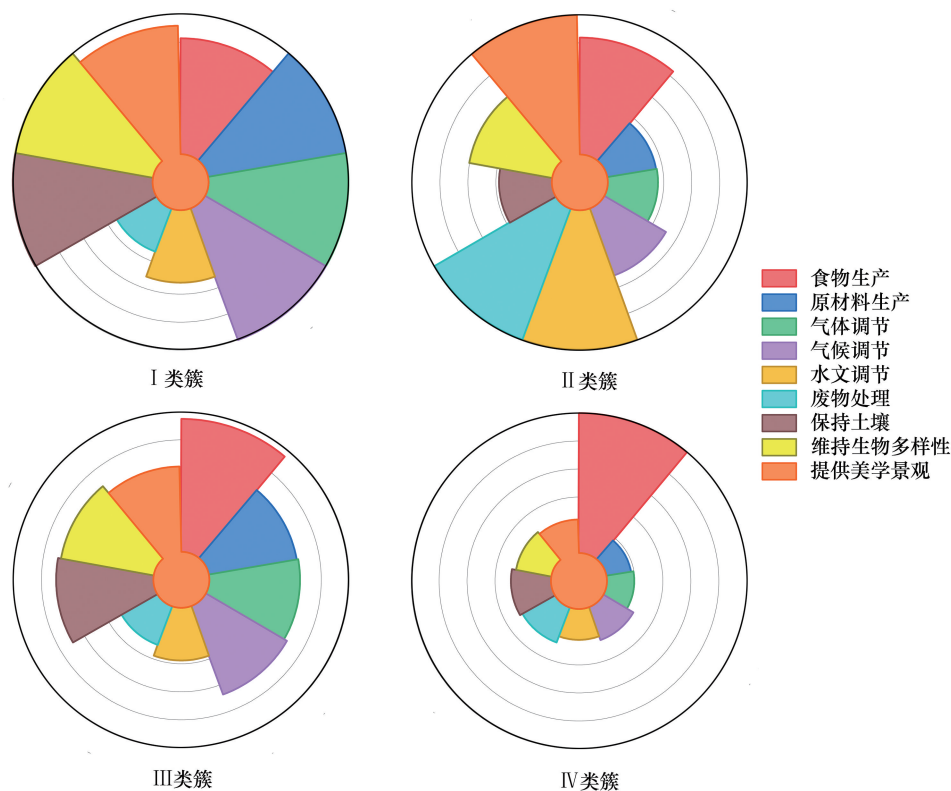


图5 四类簇生态服务功能单位面积价值组成结构

Fig.5 The composition structure of ecosystem service function per unit area of 4 bundles

(2) 水环境质量特征解析

流域水环境特征与生态服务功能存在较紧密的关联。各类簇的水环境质量评估结果显示, I类簇中水质类别主要为I—III类水,其中II类水和I类水占比分别为66%和25%; II类簇水质类别主要为II、III类水为主,其断面占比分别为36%和45%,整体水质良好; III类簇中以II、III类水为主,占比分别为30%和43%,但也有劣V类水存在。IV类簇水质类别为II—劣V类水, V类水和劣V类水的总占比达到了21%,水质整体较差。由四类簇内各断面水质主要指标浓度分布(图6)可知,生态服务价值越高的簇,水质越好,而生态服务价值水平相对较低,则水质相对较差。

2.3 水生态环境分类管控

根据各控制单元的水质特征及生态服务特征,将全省510个控制单元按生态服务簇进行分类:

1) 保护维持型:将生态服务功能高、水环境质量好的I类生态服务簇内的控制单元按保护与维持进行管控,即以生态保护为核心,维持区域优质水质,进一步提升生态服务功能。

2) 功能维护型:将具有较高废物处理、水文调节和提供美学景观的II类生态服务簇作为功能维护型进行管控。该类控制单元以维护和提升生态服务为目标,充分发挥该类型控制单元在处理废物、调节水文和美化环境等方面的作用。

3) 预防改善型:将生态服务功能中等、水质一般的III类生态服务簇内的控制单元纳入预防改善型。该类

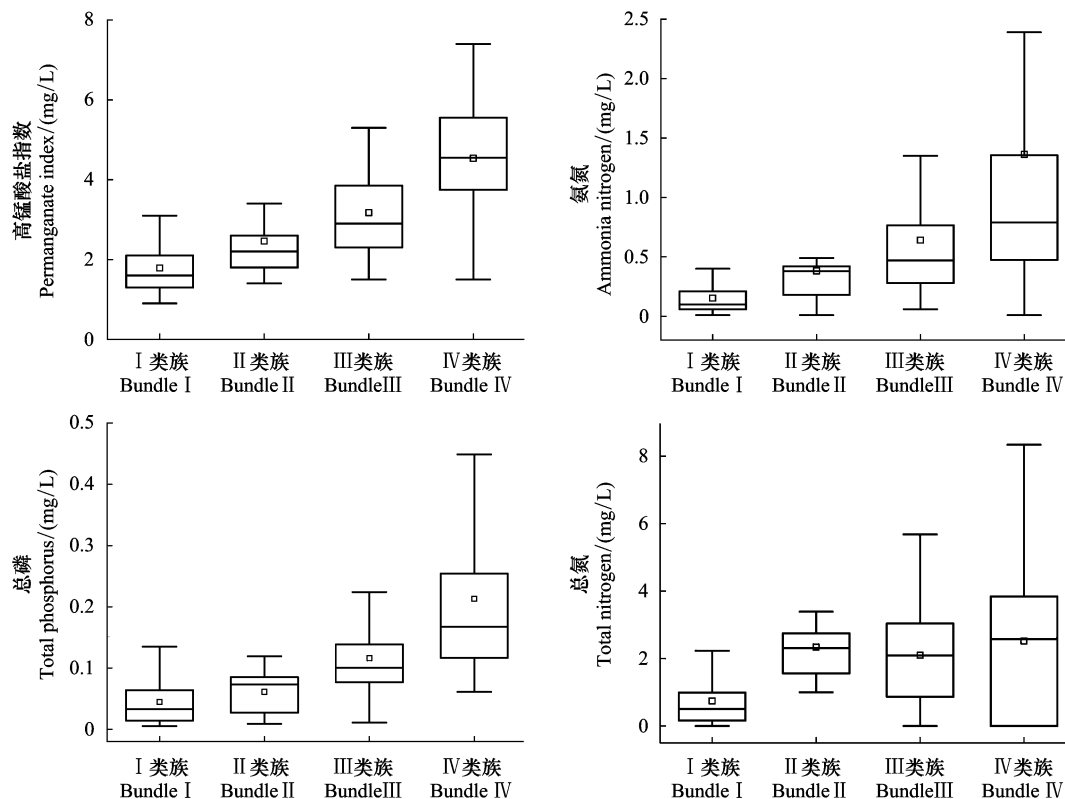


图6 四类簇主要水质指标特征

Fig.6 The characteristics of main water quality indicators of 4bundles

控制单元以维持水质总体稳定的基础上改善局部水质为目标,推进普适性污染预防及治理措施,强化污染预防。

4)整治提升型:将生态服务功能低、水质较差的IV类生态服务簇内的控制单元归为整治提升型。该类控制单元以改善水质、防范环境风险为目标,重视空间布局优化,强化污染整治,提升生态功能,按控制单元落实精细化管控。

3 结论

1)以水生态特征空间差异性为基础,根据流域生态系统特征与水质响应关系,结合子流域汇水单元、行政管理单元以及水(环境)功能区划,通过空间聚类 and 空间叠加分析划分了10个水生态功能区、510个水环境控制单元。

2)根据各水环境控制单元生态服务价值,聚类得到4类生态系统服务簇,识别了各簇的主导生态服务功能和水质特征,提出了差异化管控要求。其中I类簇内的控制单元按优先保护原则进行管理,以维持优质水质,并进一步提升生态服务功能;II类簇的控制单元以主导生态服务功能提升与维持进行管控;III类簇的控制单元以预防为主,局部治理,以提升区域水环境质量和生态功能;IV类簇内的控制单元要落实水质改善、环境风险防范的要求,加大水环境综合整治力度。

3)构建基于流域水生态水环境特征的分区分类体系,实现流域水生态保护与水环境质量改善的有机融合,为流域水生态环境精细化管理提供技术支撑。

参考文献 (References):

- [1] 樊灏, 黄艺, 曹晓峰, 高喆, 蒋大林. 基于水生态系统结构特征的滇池流域水生态功能三级分区. 环境科学学报, 2016, 36(4):

1447-1456.

- [2] 赵雪霞, 于鲁冀, 王燕鹏. 清渭河流域(许昌段)水生态环境功能分区指标体系构建. 水利水电技术, 2018, 49(9): 162-169.
- [3] 文字立, 谢阳村, 徐敏, 路瑞, 王东. 构建适应新国土空间规划的流域空间管控体系. 中国环境管理, 2020, 12(5): 58-64.
- [4] 马乐宽, 谢阳村, 文字立, 王东, 赵越, 徐敏. 重点流域水生态环境保护"十四五"规划编制思路与重点. 中国环境管理, 2020, 12(4): 40-44.
- [5] 王东, 秦昌波, 马乐宽, 王金南. 新时期国家水环境质量管理体系重构研究. 环境保护, 2017, 45(8): 49-56.
- [6] Omerik J M. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the association of American Geographers*, 1987, 77(1): 118-125.
- [7] Guo X M, Tankpa V, Wang L, Ma F, Wang Y J. Framework of multi-level regionalization schemes based on non-point source pollution to advance the environmental management of small watersheds. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, doi: 10.1007/s11356-020-12000-7.
- [8] Johnson Z C, Johnson B G, Briggs M A, Snyder C D, Hitt N P, Devine W D. Heed the data gap: guidelines for using incomplete datasets in annual stream temperature analyses. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107229.
- [9] 孙然好, 程先, 陈利顶. 基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生态功能分区. 生态学报, 2017, 37(24): 8445-8455.
- [10] 李翔, 张远, 孔维静, 郗威, 卫毅梅, 冯祯. 辽河保护区水生态功能分区研究. 生态科学, 2013, 32(6): 744-751.
- [11] 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.
- [12] 高喆, 曹晓峰, 黄艺, 李发荣. 滇池流域水生态功能一二级分区研究. 湖泊科学, 2015, 27(1): 175-182.
- [13] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125193.
- [14] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. 生态学报, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [15] Bai Y, Chen Y Y, Alatalo J M, Yang Z Q, Jiang B. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services- a case study in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137083.
- [16] Liang J, Li S, Li X D, Li X, Liu Q, Meng Q F, Lin A Q, Li J J. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123851.
- [17] 谭颖, 郑训皓, 陈慈, 刘玥, 王璐, 官昭瑛, 杨海军, 韩博平. 流溪河大型底栖动物群落的时空分布及其影响因子. 生态学报, 2021, 41(2): 747-760.
- [18] Liang L W, Wang Z B, Li J X. The effect of urbanization on environmental pollution in rapidly developing urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117649.
- [19] Thornhill I, Ho J G, Zhang Y C, Li H S, Ho K C, Miguel-Chinchilla L, Loisele S A. Prioritising local action for water quality improvement using citizen science; a study across three major metropolitan areas of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1268-1281.
- [20] del Río-Mena T, Willems L, Vrieling A, Nelson A. Understanding intra-annual dynamics of ecosystem services using satellite image time series. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 710.
- [21] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [22] Xie G D, Zhen L, Lu C X, Xiao Y, Li W H. Applying value transfer method for eco-service valuation in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 51-59.
- [23] 浙江省统计局. 2015 年浙江省国民经济和社会发展统计公报. (2016-02-29). <https://max.book118.com/html/2017/0830/130888876.shtm>.
- [24] 国家发展改革委, 财政部, 农业部, 国家粮食局, 中国农业发展银行. 关于公布 2015 年稻谷最低收购价格的通知. (2015-02-06). http://www.lswz.gov.cn/html/tzgg/2018-06/12/content_215331.shtml.
- [25] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. *Science of the Total Environment*, 2016, 574(1): 137-147.
- [26] Tolessa T, Senbeta F, Kidane M. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 47-54.
- [27] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, Zhang L M. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 146-154.
- [28] Fu B L, Li Y, Wang Y Q, Zhang B, Yin S B, Zhu H L, Xing Z F. Evaluation of ecosystem service value of riparian zone using land use data from 1986 to 2012. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 873-881.
- [29] Hong Y Y, Ding Q, Zhou T, Kong L Q, Wang M Y, Zhang J Y, Yang W. Ecosystem service bundle index construction, spatiotemporal dynamic display, and driving force analysis. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1843972.
- [30] Saidi N, Spray C. Ecosystem services bundles: challenges and opportunities for implementation and further research. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(11): 113001.