

区域环境功能管控区划方法及应用

陈好凡^{1,2}, 徐勇^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以生产、生活污染源为对象进行环境空间管控是新时期区域环境保护治理和国土精细化管治的新路径。本文在明确区域环境功能管控区划的概念、目的和原则的基础上, 科学识别污染物与污染源空间, 提出管控单元和分级管控区的空间结构模式, 建立环境污染物的单项评价指标算法和综合集成模型, 形成区域环境功能管控区划技术方法, 并在浙江省嵊州市进行县级尺度的实证应用研究。研究表明, 嵊州市共有垃圾填埋场、污水处理厂、高污染型工业场所、畜禽养殖场、居民居住场所等18个管控单元类型, 按集成特征值高低及污染排放特征可归类至V级、IV级、III级、II级、I级和O级管控区。V级和IV级管控区以工矿业生产空间为主, 污染排放量大, 对水体、大气和土壤等影响程度高, 存在危害性, 是源头管控的重点。III级管控区覆盖生活空间, 污染排放中等, 影响大气和水体, 可控性相对较弱。II级管控区有少量的农业固废和废水排放, 存在面源污染风险。I级和O级管控区内部无环境污染源, 强调生态保护的重要程度。其中, O级管控区是生态保护红线范围, 实施最严格的环境保护制度, 要求“零排放, 零污染”。区域环境功能管控区划方法具有可操作性, 可为地方开展中长期环境保护与发展规划提供新的方法。

关键词: 区域环境功能; 管控单元; 分级管控区; 污染源空间; 嵊州市

DOI: 10.11821/dlxb202103012

1 引言

推进区域环境质量整体提升迫切要求对环境功能基础、现状及空间管理困境进行科学评估。区域环境功能管控区划是指在一定时期和一定环境科学技术条件下, 基于对区域自身向环境排放污染物的性质及来源特点的认识, 选择评价指标、建立指标算法、开展污染物排放源单项和综合集成评价, 并按一定规则对污染源空间进行等级和类型划分。常见的环境功能分区是按照区域或者环境要素为人类活动承担环境功能进行分类管理的一种区划体系^[1], 它作为环境空间管控的有效手段已得到国际的广泛认可。如对流域进行分区管理以遏制水环境质量持续下降^[2-3], 利用大气环境功能分区来控制 and 改善城市因交通污染造成的大气污染问题^[4], 多环境问题叠加制定综合环境功能区划和环境质量标准等^[5]。中国环境空间规划目的与国外分区相似, 皆是在反映区域环境污染水平的基础上实现分区管理和分类指导^[6], 最终为地方环境保护与生态建设提供科学依据^[7]。20世纪70

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-12-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23020101) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA23020101]

作者简介: 陈好凡(1994-), 女, 浙江舟山人, 博士生, 主要从事区域经济与可持续发展研究。

E-mail: chenhyf16s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 徐勇(1964-), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展、人地关系机理模拟、土地利用、农业与乡村发展等领域的研究工作。E-mail: xuy@igsrr.ac.cn

年代末以来,中国学者先后开展了“两控区”划分^[8]、水环境功能区划^[9]、大气(噪声)功能区划^[10-11]、生态功能区划^[12]、环境功能区划^[13]、“三线一单”^[14-15]等环境规划理论与方法研究。由此可见,中国的生态环境空间管控已经历3个阶段,依次为以环境要素为主的探索阶段、以功能区划为主的发展阶段和以生态保护红线为基础的完善阶段^[16]。以上各类环境空间管控的目标设置更多的是考虑空间单元的功能评价,涵盖了生态、环境、经济社会等多层面要素,分区管理强调主导性的生态环境服务功能^[13,17],缺少能够直接反映环境污染物排放特征的评价结果。编制区域环境功能管控区划,对环境污染源进行等级差异性评价,旨在为不同区域差异化环境政策制定提供空间管控载体,进而通过对环境污染源空间的精细化管治,推动环境更高质量发展,最终实现“创新发展、绿色发展、协调发展”的国家战略目标。

环境污染物种类庞杂,分类体系多样,但来源一般都有具体明确的空间指向,即环境污染源。环境污染源是指向环境系统排放污染物的发生源^[18],它应当是环境污染空间管控的直接对象。污染源排放量核算是污染源空间等级划分和分区管控的关键和基础。国内外量化研究多集中于单项污染物评价,其中常见的是通过源排放清单来分析大气环境中各类污染源各种污染物的排放特征。美国^[19-20]、欧洲^[21-22]、亚洲^[23-24]等地的环保部门均先后建立了全国性或区域性的大气污染物综合排放清单,但尚无统一标准。中国也在SO₂、NO_x、VOC_s、颗粒物等方面有了一定进展^[25-28],研究方法包括排放因子法、模型法、直接测量法、调研法等^[29-31]。水污染评价的研究重点一般在于水体污染物成分和因子解析,如利用主成分分析法确定污水中的主要成分,并由此成分确定其所代表的潜在污染源^[32-34]。Neuman等^[35]最早将反问题求解理论引入到水文水资源领域,后有学者利用反向追踪法^[36]、不确定性分析^[37]、贝叶斯推理^[38-39]等优化改进方法,实现了水污染源位置识别与泄露过程模拟。多项环境污染物排放综合评价的研究成果并不多见,但可借鉴的方法有诸如加权求和法、网格叠加法、地理相关分析法等^[40-42],以上定量模型在其它研究的综合集成中都有实证应用。中国的环境空间管控已从末端治理走向源头防控,管控范围由点源治理发展为区域综合治理^[43]。污染源具有空间属性,相关领域的多要素综合集成方法可供环境功能分级管控区划借鉴。

基于此,本文借鉴国内外环境空间管控相关研究的学术思想,以人类活动污染源为对象,提出管控单元与分级管控区的空间结构模式,科学识别固体废弃物、水体污染物和大气污染物的污染源空间,对其污染排放等级进行单项评价和综合集成,形成区域环境功能管控区划的理论和技術方法,并以浙江省嵊州市为案例开展实证应用研究,以期为实现国土空间精细化环境管治和区域环境政策规制精准落地提供科学依据和技術参考。

2 理论与方法

在明确区域环境功能管控区划概念、目的和原则的基础上,针对人类生产、生活空间污染物排放种类性质和储运治理方式,界定污染源空间管控单元和管控区的分类、分级谱系。针对污染源固废、水体和大气污染物排放特征,按单项污染物选择评价指标,建立评价指标算式,结合水体和大气污染物排放的扩散影响,进行污染源空间等级类型划分。通过对固废、水体和大气污染物排放源等级类型的综合集成,形成污染源空间管控区划的技術方法。选取不同尺度的案例区进行实证研究,提出针对管控区或管控单元的治理对策。由此,完整的区域环境功能管控区划的总体框架由理论基础、单项评价、综合集成和实证应用4个部分组成(图1)。

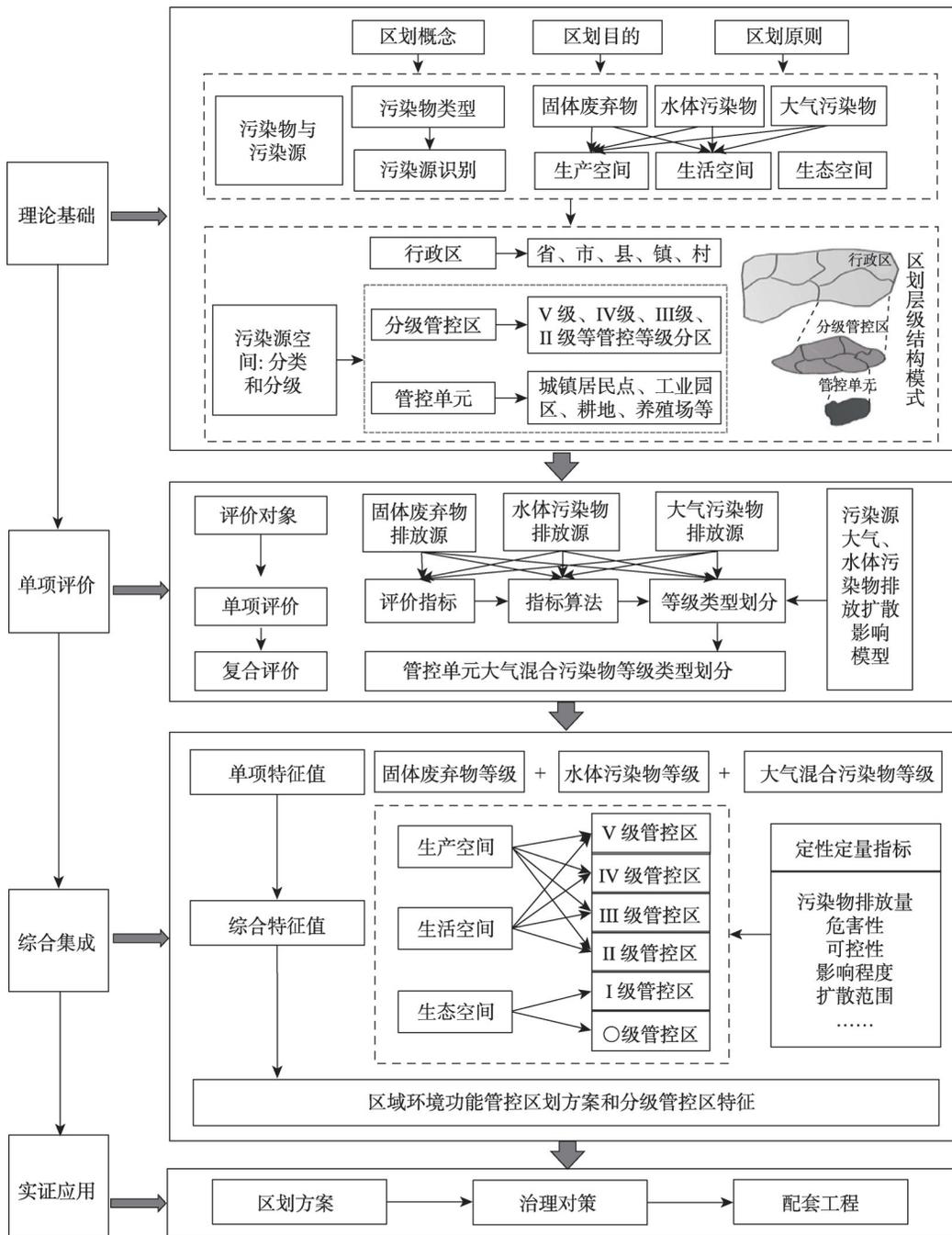


图1 区域环境功能管控区划总体框架

Fig. 1 Framework of regional environmental function management and control zoning

2.1 理论基础

2.1.1 区域环境功能管控区划原则 依据区域环境功能管控区划的概念内涵、污染物种类性质、污染物来源特点以及开展管控区划的目的，综合近年来国内外关于环境功能区划、生态功能区划、主体功能区划等^[12-15]相关研究成果，开展区域环境功能管控区划一般宜遵循以下几个基本原则。

(1) 突出生产生活空间, 兼顾生态空间。环境污染物种类庞杂, 类型多样, 来源不外乎自然排放和人为排放2种方式。人为排放的污染物主要包括固体废弃物、水体污染物、大气污染物3个类型, 且来源都有明确的人类活动空间指向。区域环境功能管控区划将以人类活动生产和生活空间为对象, 在对人类活动污染源空间进行分级管控分区的基础上, 将生态空间按“保护优先、兼顾一般”的原则纳入管控区划体系。

(2) 管控单元强调同质性, 管控区注重等级差异性。区域环境系统的整体性和污染物种类性质及来源的多样性要求环境功能管控区划宜采取管控单元和分级管控区两层级结构模式。管控单元注重污染源空间的同质性和相似性, 分级管控区侧重于污染源空间排放污染物的数量多寡、危害性程度及影响范围大小。管控单元是基础, 管控区是对管控单元的等级综合。换句话说, 区域环境功能管控区划就是以生产、生活、生态管控单元为基础的区域环境功能分级管控分区。

(3) 污染物排放种类性质和收集储运方式的相似性。不同的污染物排放源在排放种类、性质、收集、储运方式等方面存在着显著差异, 区域环境功能管控区划应尽可能将上述特征相似的污染源划归同一管控单元。如农村居民点是农村居民生活居住的场所, 排放的固体废弃物、水体污染物、大气污染物在种类、性质、收集、储运方式等方面相似, 故农村居民点应视为一个管控单元; 一定地域范围内的多个农村居民点, 其差异仅体现在人口集聚规模和污染物排放量的多寡等方面, 故一般可将多个农村居民点归为一种管控单元类型。不同管控单元或管控单元类型之间则差别显著, 如城镇、耕地、采矿区等相互之间差异性显著, 故分别属于不同的管控单元。

(4) 污染物治理工艺和管控政策的相似性。不同污染源的空间管控应有特殊的环保设施或工艺予以治理, 有相应的法律法规予以规范, 有专业的环保部门或机构予以执行, 有具体的政策工具予以保障。将治理工艺和管控政策相似的污染源空间划归同一管控单元或同一等级的管控区, 便于针对不同管控区制定管控力度与等级类型适配的政策规制体系和配套的具体对策措施。

2.1.2 污染物与污染源识别 环境污染源包括自然污染源和人为污染源两大类型。人为污染源是指人类生产和生活活动过程中向环境系统排放污染物的场所、设施或装置。本文针对固体废弃物、水体污染物和大气污染物, 阐释主要污染物类型及其人类生产和生活活动的空间指向。

固体废弃物分为生活固废、工业固废和农业固废3种类型。生活固废即生活垃圾, 可分为厨余垃圾、可回收垃圾、有害垃圾和其他垃圾四大基本品类, 污染源空间指向城镇和农村居民点、餐饮场所、医疗卫生场所等。工业固废包括采矿废石、冶炼废渣、煤矸石、金属渣、废石膏、建筑用砖等一般工业固废和危险固废, 污染源空间指向工业园区、采矿区、建筑工地等。农业固废包括农作物秸秆、畜禽排泄物、农用地膜等, 污染源空间指向耕地、畜禽养殖场、屠宰场等。

人类活动导致的水体污染物有生活污水、工业废水和农业废水等。生活污水包括洗涤废水、粪尿污水、垃圾渗滤液等, 污染源空间指向城镇和农村居民点, 少量源自工业园区和采矿区。工业废水包括生产废水、煤矿污水、泄油污水等, 污染源空间指向化工园区、采矿区、储油设施场所、输油管道沿线等。农业污水包括农田废水、畜禽粪尿等, 污染源空间指向耕地、茶果园地、畜禽养殖场等。

大气污染物种类多、性质各异, 本文关注的大气污染物有 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 等。 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染源空间指向化工园区、采矿区、城镇和农村居民点等。 NH_3 的污染源空间则指向畜禽养殖、耕地、园地等。不同污染源空间内造成大气污染排放的

人类生产、生活行为不同,可进一步解析。 SO_2 、 NO_x 的来源较为相似,可归纳为固定燃烧源、工艺过程源和移动发生源。 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源可分为一次源和二次源,具体为固定燃烧源、移动发生源和扬尘源。 NH_3 的来源有农业种植源、畜禽养殖源和人体排放源。

2.1.3 管控单元与管控区 管控单元与分级管控区是本文为开展区域环境功能管控区划而专门设定的2个污染源空间概念。

(1) 管控单元

管控单元是指排放的污染物种类、性质、储运和治理措施等基本相同的污染源空间,着重强调的是污染物及其处理过程的同质性。如图2所示,依据人类生产生活排放污染物的性质及其来源特点,污染源空间管控单元可按生产、生活和生态划分为3个大类。其中,生产空间可划分为工矿业生产空间、农业生产空间和特殊生产空间3个亚类。工矿业生产空间主要包括采矿区、普通制造业场所、基础性工业场所、高污染型工业场所等管控单元;农业生产空间主要包括耕地、园地、畜禽养殖场等管控单元;特殊生产空间主要包括垃圾填埋场、污水处理厂等管控单元。生活空间的管控单元主要包括城镇居民居住场所、农村居民居住场所、交通运输场所等。生态空间可划分为基础生态空间和特殊生态服务功能空间2个亚类。基础生态空间的管控单元主要包括林地、草地、河湖水域、湿地、沙漠、戈壁。其中,依据生态系统服务功能划定的水源涵养区、生物多样性保护区、水土保持区、防风固沙区等属于特殊生态服务功能空间的管控单元。

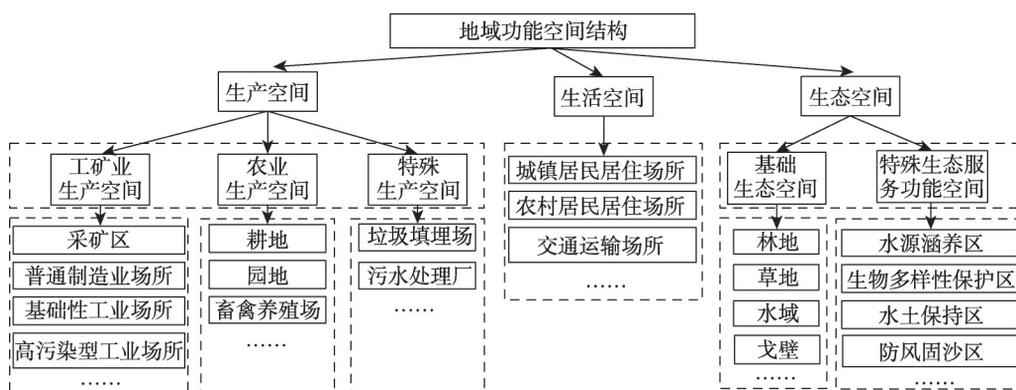


图2 环境功能管控单元分类体系

Fig. 2 Classification system of environmental function control units

(2) 分级管控区

分级管控区是指不同管控单元在区域环境功能管控区划类型体系中的管控等级,侧重于污染物排放数量的多寡、危害性程度以及对环境污染影响程度的等级性。分级管控区比管控单元高一个层级,它可以看作是排放的污染物性质相似或采取的治理对策措施相近的管控单元集合。一般来说,有人类活动的生产和生活空间,按管控等级由高到低,依次可划分为V、IV、III、II等4个等级的管控区;无人类活动的生态空间,可按生态保护的重要性程度划分为○级管控区和I级管控区,其中,○级管控区应与生态保护红线高度匹配,实施最严格的环境保护制度,强制要求“零污染,零排放,零影响”(表1)。

2.2 单项污染物排放源评价

本文主要针对固体废弃物、水体污染物和大气污染物进行单项指标评价。由于管控单元的固废排放和废水排放在性质、储运及治理等方面具有同质性或相似性,故本文关于固废排放总量和废水排放总量均可基于通识性算法展开^[44-45]。而大气污染种类多、性质各异,需采用单项大气污染物排放量和综合特征值作为定量评价指标。

表1 环境功能分级管控区人为污染物排放特征

Tab. 1 Emission characteristics of man-made pollutants in hierarchical control area of environmental function						
分级管控区	污染物类型	排放量	危害性	可控性	影响范围	
生产和生活空间	V级管控区	固废、废水、废气	大	有毒性、放射性等危害性	高	影响水、土、气,程度高,范围广
	IV级管控区	固废、废水、废气	较大	存在一定危害性,但无有毒性、放射性	高	影响水、土、气,程度和范围较V级小
	III级管控区	固废、废水、废气	中等	少量危害性	较高,大气可控性弱	影响水和气,程度低,范围小
	II级管控区	有机质污染物	少量	基本无危害	弱	影响水体,程度低,范围广
生态空间	I级管控区	管控区外的污染物	微量	无	较弱	基本无影响
	○级管控区	无人类活动污染物	零	无	高	无影响

(1) 固体废弃物排放总量测算

$$ES_k = \sum_{i=1}^n P_{Ki} \times S_{Ki} \quad (1)$$

式中: ES_k 为第 k 个管控单元或管控单元类型的固废排放量; S_{Ki} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种固废排放强度; P_{Ki} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种固废的排放客体数量; n 为被测算的固废种类数。

(2) 废水排放总量测算

$$EW_k = \sum_{i=1}^n P_{Ki} \times W_{Ki} \quad (2)$$

式中: EW_k 为第 k 个管控单元或管控单元类型的污水排放量; W_{Ki} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种污水排放强度; P_{Ki} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种污水的排放客体数量; n 为被测算的污水种类数(生活污水、工业废水和农业废水等)。

(3) 大气污染物排放测算

不同污染源排放大气污染物的类型和数量不同。本文利用排放因子法对管控单元不同污染排放源的不同污染物进行分项计算^[27-31]。

$$EA_{K,i,j} = \alpha \times PA_{Ki} \times EF_{Kij} \quad (3)$$

式中: $EA_{K,i,j}$ 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 j 种排放源第 i 种大气污染物的排放量; PA_{Ki} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种污染物的物质投入参量,如燃料消耗量、民用燃气使用量、氮肥施用量等; EF_{Kij} 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种污染物第 j 种排放源的基准排放因子; α 为排放因子校准系数,如污染控制设施去除效率、施肥校正系数等。

式(3)适用于固定燃烧源、工艺过程源、裸露地面扬尘源和农业源的污染物年际排放量计算。而移动发生源和道路扬尘源的大气污染物年际排放量计算公式分别如式(4)和式(5)所示。

$$EA_{Vi} = PA_V \times EF_{Vi} \times VKT \quad (4)$$

式中: EA_{Vi} 为交通运输场所第 i 种污染物的年排放量; PA_V 为不同类型机动车的年均保有量; EF_{Vi} 为交通运输场所移动发生源第 i 种污染物的排放系数,即不同类型机动车行驶单位距离排放的第 i 种污染物的量; VKT 为不同类型机动车的年均行驶里程数。

$$EA_{Ri} = EF_{Ri} \times L \times N \times \left(1 - \frac{n}{365}\right) \quad (5)$$

式中: EA_{Ri} 为交通运输场所扬尘源第 i 种污染物的总排放量; EF_{Ri} 为扬尘源第 i 种污染物的排放系数; L 为道路长度; N 为一定时期内车辆在该段道路的平均车流量; n 为不起尘天数。

大气混合污染物的综合特征值以单项污染物排放量为基础, 先对单项指标值标准化, 进而通过对单项指标进行加权求和得出。

$$EA_K = \sum_{i=1}^n \omega_i \times \overline{EA_{Ki}} \quad (6)$$

式中: EA_K 为第 k 个管控单元或管控单元类型大气混合污染物的综合特征值, $\overline{EA_{Ki}}$ 为第 k 个管控单元或管控单元类型第 i 种污染物排放量的标准化值; ω_i 为第 i 种大气污染物的权重值; n 为被测算的大气污染物种类数。

2.3 管控分区集成方法

2.3.1 集成依据与规则 以固体废弃物、水体污染物和大气污染物排放源空间等级划分为基础, 综合考虑污染物性质、被污染对象、污染物转移过程及处理方式等因素, 采用定性和定量相结合的方法, 对管控单元或管控单元类型进行集成式分级管控分区。定性评价旨在针对性质不同的污染物, 从对人体或生物体危害性程度及可控性等方面, 对比评判不同管控单元的高低等级; 定量评价则根据不同污染物的排放量大小对管控单元进行等级分区。区域环境功能管控分区集成依据和规则如下:

(1) 管控单元排放污染物对环境的影响具有累积性。每个管控单元产生的固废、污水和大气污染物存在性质和污染对象的差异, 但对环境整体造成的污染效果是相同的。即每类或每种污染物互不包含, 对环境整体的污染效果具有累积效应。“标准空气”由 78.09% 的 N_2 、20.95% 的 O_2 和 0.96% 的其它成分组成, 大气污染物 (不管是哪种污染物) 的增加必然导致单位体积空气中“标准空气”所占份额的下降, 这也是大气污染源空间等级类型划分采用混合污染物综合特征值算法的理论依据。同理, 水体污染物增多必然导致单位水体中“标准水”份额下降; 固废的增多在占用储、运、处理空间等方面与前者存在类似的情况。污染物的环境影响累积性是对管控单元各类污染物进行“求和”集成的重要依据。

(2) 区域环境功能管控分区具有等级性。对污染源空间进行分等级, 管控区的等级越高, 表明污染物排放量越大、危害性程度越高、影响范围越广, 反之亦然。据此, 人类生产、生活空间可划分为 4 个等级管控区。此外, 生态空间可按生态保护的重要性程度, 划分为 2 个等级管控区。

(3) 跨界污染源空间需考虑污染物扩散影响。对于跨省、跨地级市的水体污染源和大气污染源空间可根据污染物跨界影响的程度和范围, 对污染源空间的隶属管控区等级进行必要调整。污染物跨界影响的程度和范围一般可通过建立水体污染物扩散影响模型和大气污染物扩散影响模型模拟得出。

(4) 其他依据和规则。主要体现在 3 个方面: ① 对于排放污染物种类、性质及治理措施相同或相近的管控单元, 尽可能划入同一级管控区, 如城镇与农村居民居住场所, 耕地与园地; ② 对于垃圾填埋场、污水处理厂等缺乏指标数据的特殊管控单元, 可通过与其他管控单元的定性比较, 划入适当等级的管控区; ③ 对于无人为污染物排放的生态空间, 可将生态红线区域从生态空间中分离出来, 单独作为一个特殊管控区。

2.3.2 集成方法与步骤 根据区域环境功能管控区划原则和分级管控分区依据规则, 建立一套以“行政区—分级管控区—管控单元”自上而下的空间聚类单元为核心, 以“单项评价—复合评价—集成评价”自下而上的评价体系为支撑的环境功能分级管控分区方法。

首先,以管控单元固废、污水、大气混合污染物排放等级为基础,分别对各管控单元按照排放量大、较大、中等、较低和无排放依次赋值4、3、2、1、0;其次,对管控单元的三类污染物排放的等级赋值求和,得出每个管控单元的集成特征值;再次,对应分级管控区特征,按集成特征值的高低依次将管控单元纳入各级管控区;最后,结合既有已划定的生态保护红线方案,从林地、草地、水域、湿地等生态空间中筛选出生态保护红线类型区,作为特殊的〇级管控区。

3 嵊州市应用实例

嵊州市隶属浙江省绍兴市,地处杭州、宁波、温州、金义四大都市圈的十字交叉点,是浙东地区重要的节点城市。嵊州四面环山,全境基本属于曹娥江流域,长乐江、新昌江等汇合于市区剡溪,分布有南山水库等多个饮用水水源地,水资源丰富,且水质要求高。此外,嵊州市保留有15处规模化的采矿区,硅藻土远景总储量达5亿t,属特大矿藏,居全国首位。优势独特的自然资源,使得嵊州市成为绍兴市乃至浙江省生态文明建设的重要标杆。

嵊州市具有典型的“块状经济”特征,是“浙江制造”的试点城市。嵊州的三大传统优势产业为机械电机、领带服装和厨具电器,使得其工业污水和固废排放量在绍兴市的市县总量中分别占41.8%和31.1%。而且,嵊州市是浙江省养猪规模最大的市县,生猪年存栏量高达27.83万头,污染物排放存在量大且种类多的问题。此外,嵊州市仍面临严峻的环境质量问题。部分区域大气污染及恶臭问题较为严重,主要集中在医药化工、印染造纸、家具涂装和垃圾处置等行业。在嵊州市的地表水环境质量评估中,因周边生活源污染较重,部分水质断面仍存在超标现象。

由此可见,嵊州市有着绍兴市普遍存在的环境短板,又受资源结构影响,存在一些特殊的环境问题。为实现“美丽嵊州”的建设目标,保障环境高质量发展,嵊州市亟需对环境污染源进行基础评估,通过分类和分等定级的方式,为环境管控对策提供空间载体。本文选择嵊州市作为区域环境功能管控区划的县级试点城市,基于以上管控单元内涵和人为污染物排放特征,科学识别嵊州市的环境污染管控单元类型,结果如图3所示。

本文涉及到的数据包括图件数据、环境普查数据、调研数据和统计数据。图件数据源于2018年第3次嵊州市土地利用详细调查数据;环境普查数据源于2018年第2次嵊州市污染源普查数据;环保统计数据源于《嵊州市环境统计公报(2018)》《嵊州市环保质量报告书(2019)》《污染源排放清单编制技术指南》;经济社会统

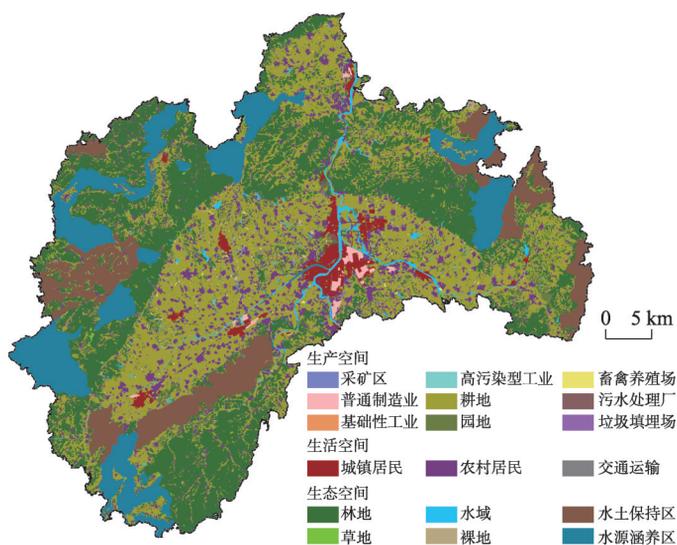


图3 嵊州市环境功能管控单元的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of environmental function control unit in Shengzhou city

计数据源于《嵊州市统计年鉴（2019）》《绍兴市统计年鉴（2019）》。此外，2019年6月在嵊州市经济开发区、高新技术产业开发区、嵊新污水处理厂、生活垃圾填埋场、农村养猪场等进行实地调研，补充获取缺失的管控单元的地理空间信息、污染物排放量、污染源排放系数等。

3.1 固废排放源空间等级类型

本文关于固废排放源空间等级划分采用固废排放总量作为定量评价指标，管控单元固废排放总量包括生活垃圾排放量、工业固废排放量和农业固废排放量。根据公式（1）得到嵊州市各管控单元/类型的固废排放总量，基于Jenks的自然间断点分级法，结合管控单元固废排放类型和性质，将嵊州市固体废弃物污染源空间按 ≥ 16 万t/a、12~16万t/a、4~12万t/a、0~4万t/a和0 t/a依次划分为排放量大、较大、中等、较小和无排放5个等级类型（表2）。

表2 嵊州市固废污染源空间等级类型基本特征

Tab. 2 Characteristics of classified areas of solid waste pollution sources in Shengzhou city

等级类型	排放量区间(万 t/a)	主要管控单元/类型	土地面积(hm ²)
排放量大	≥ 16	垃圾填埋场、污水处理厂	40.86
排放量较大	12~16	工业园区 ^① 、采矿区、畜禽养殖场	1418.31
排放量中等	4~12	城镇、农村居民居住场所	11484.20
排放量较小	0~4	交通运输场所、耕地、园地	67961.84
无排放	0	上述以外的管控单元	98071.77

注：^①工业园区包括基础性工业、高污染型工业和普通制造业，其中普通制造业固废排放量显著少于前两者。

嵊州市固体废弃物污染源的空间等级类型分布如图4所示。从管控单元的固废排放类型与总量分布来看，垃圾填埋场和污水处理厂作为固废集中处理地，具有排放量大且污染物类型复杂的特点。工矿业生产空间以及畜禽养殖场是工业固废和农业固废的集中排放地。城镇和农村居民居住场所的固废排放以生活垃圾为主，耕地、园地等农业生产空间则有少量农业固废排放。

3.2 污水排放源空间等级类型

本文关于水体污染源空间等级划分采用污水/废水排放总量作为定量评价指标，人类活动导致的水体污染物主要包括生活污水、工业废水和农业废水等。根据公式（2）可测算得到各管控单元类型的污水排放总量，结合管控单元污水排放性质特点，可将嵊州市污水排放源空间划分为排放量大、较大、中等、较小和无排放5个等级类型（表3）。由于各管控单元之间的排放量差距悬殊，故不能做基本的均等聚类。

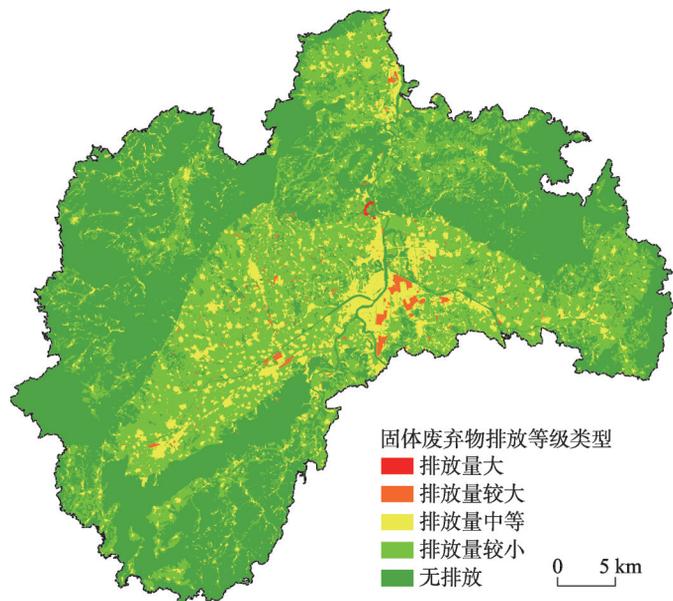


图4 嵊州市固体废弃物排放源空间等级类型分布

Fig. 4 Spatial distribution of classification of solid waste pollution sources in Shengzhou city

表3 嵊州市污水排放源空间等级类型基本特征

Tab. 3 Characteristics of classified areas of wastewater pollution sources in Shengzhou city

等级类型	主要管控单元/类型	土地面积(hm ²)
排放量大	城镇、农村居民居住场所、工业园区 ^① 、采矿区 ^②	12786.19
排放量较大	畜禽养殖场、垃圾填埋场、污水处理厂 ^③	160.81
排放量中等	耕地、园地 ^④	66623.79
排放量较小	交通运输场所	1338.05
无排放	上述以外的管控单元	98071.77

注: ^①工业园区中,普通制造业污水排放量显著小于基础性工业和高污染型工业;^②采矿区污水排放指标值被包含在工业园区中;^③污水处理厂(农村生活污水治理终端、嵊新污水处理厂)的指标值属重复统计,需考虑直接出水水质和河道水质标准;^④园地污水排放指标值被包含在耕地中。

由图5可知,城镇和居民居住场所以及工矿业生产空间是生活污水和工业废水排放的主要管控单元,其中,大量生活污水排放带来相应的化学需氧量和氮氧含量排放的增加。污水处理厂是嵊州市区及周边地区生活污水和工业废水的集中处理地,排放水量大,垃圾填埋场的污水以垃圾渗滤液为主,畜禽养殖场则是动物粪尿等农业废水。耕地、园地等农业生产空间会有少量农业废水排放,且因氮、磷、钾等肥料施用会造成面源污染。

3.3 大气混合污染物排放源空间等级类型

人类活动向大气排放的二氧化硫、氮氧化物、颗粒物和氨气等都是性质不同的大气污染物,互相不具有可比性,不同污染物排放量的多寡从不同侧面反映了大气的受污染状况。首先根据式(3)~(5)对4种污染物排放量进行测算,后根据式(6)经标准化去量纲后进行等权重加权求和,得到的综合特征值可有效反映不同排放源空间的大气混合污染物的排放差异。

基于Jenks自然间断点分级法,根据不同管控单元的大气混合污染物排放综合特征值由高到低,按综合特征值 ≥ 1 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.2\sim 0.5$ 、 $0\sim 0.2$ 、 0 依次可将嵊州市大气污染源空间划分为排放量大、较大、中等、较小和无排放5个等级类型。大气混合污染物污染源空间等级类型特征见表4。

嵊州市大气混合污染物污染源空间等级类型分布如图6所示。根据大气污染物污染源空间等级划分,生产空间,尤其是工矿业生产空间是大气混合污染物集中排放场所,大气污染物以 SO_2 、 NO_x 为主,畜禽养殖场、耕地等农业生产空间则以 NH_3 排放为主。生活空间中的交通运输空间是 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 集中排放场所,而城镇和农村居民居住场所亦有不同程度的大气污染物排放。此外,垃圾填埋场和污水处理厂作为固废集聚地或污水集

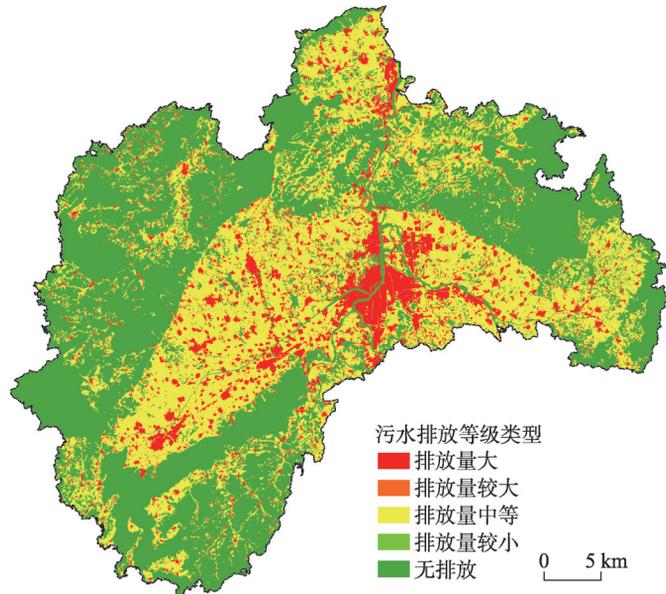


图5 嵊州市污水排放源空间等级类型分布

Fig. 5 Spatial distribution of classification of waste water pollution sources in Shengzhou city

表4 嵊州市大气混合污染物排放源空间等级类型基本特征

Tab. 4 Characteristics of classified areas of mixed-air pollution sources in Shengzhou city

等级类型	特征值区间	主要管控单元/类型	土地面积(hm ²)
排放量大	≥ 1	交通运输场所、高污染型工业场所、畜禽养殖场、垃圾填埋场、污水处理厂	1530.00
排放量较大	0.5~1	基础性工业场所、采矿区	661.98
排放量中等	0.2~0.5	普通制造业场所	609.65
排放量较小	0~0.2	城镇、农村居民点、耕地、园地	78107.99
无排放	0	上述以外的管控单元	98071.77

中地, 极易在垃圾或污水处理过程中产生废气, 亦是大气混合污染物高排放场所。

3.4 环境功能分级管控分区方案

基于上文测算得到的嵊州市不同环境功能管控单元的固废、污水、大气混合污染物排放等级赋值, 将其做求和处理, 可得到各管控单元的集成特征值, 并将其排序和均等聚类纳入至各级管控区, 得到嵊州市环境功能管控区划(图7)。

嵊州市环境功能分级管控区共涉及到6级, 各级管控区在污染源排放的性质特征上有较大区别, 具体如下:

(1) V级管控区。该区内的管控单元主要是污水处理厂、垃圾填埋场、高污染型工业场所等生产空间, 集成特征值为

11, 属于点源污染, 占地面积为83.59 hm², 占嵊州市域面积的0.05%。其中, 污水处理厂和垃圾填埋场属于特殊管控单元, 集中处理嵊州市区及周边的生活污水和生活垃圾, 固废和污水大量积聚, 且在微生物分解过程中极易产生大量废气。嵊州市高污染型工业场所主要以火电、印染和化工行业为主, 废气和废水排放量大, 污染物在工艺末端会集中处理, 可控性强, 但部分污染物仍存在潜在的危害性, 对大气、水体和土壤存在污染隐患。

(2) IV级管控区。该区内的管控单元主要是采矿区、基础性工业场所、畜禽养殖场等生产空间, 集成特征值为10, 以点源污染为主, 有少量面源污染, 面积为778.31 hm², 占嵊州市域面积的0.44%。嵊州市基础性工业场所以钢铁、水泥、建材行业为主, 在生产工艺过程中会有大量工业固废堆积, 且会产生少量的污水和废气排放。嵊州保留有15个采矿区, 存在露天矿剥离或坑内采矿产生的大量废石、采煤产生的煤矸石、选矿产生的尾矿等工业固废, 固废集聚量略高于基础性工业场所。此外, 嵊州市保留有多个规模化的畜禽养殖场, 大量的粪便和粪尿堆积极易产生废水、废气和土壤污染, 但可控性强, 可通过消纳池等进行集中处理。

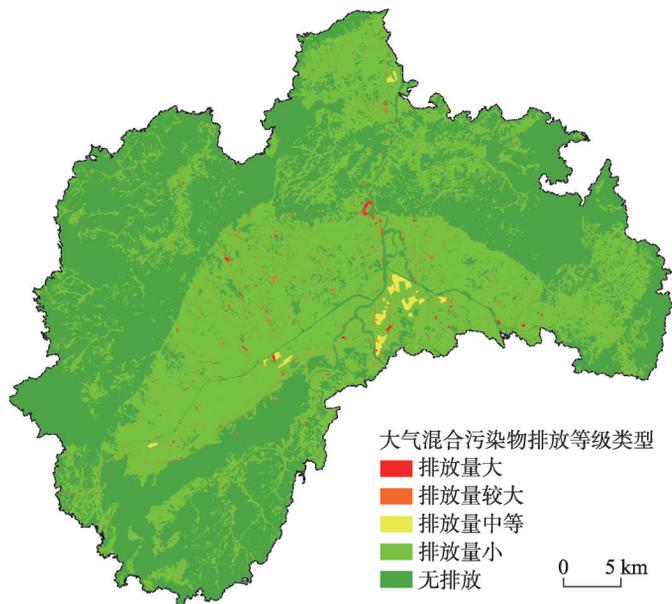


图6 嵊州市大气混合污染物排放源空间等级类型分布

Fig. 6 Spatial distribution of classification of mixed-air pollution sources in Shengzhou city

(3) III级管控区。该区内的管控单元主要是城镇、农村居民点、交通运输场所等生活空间，以及普通制造业场所这类工业生产空间，集成特征值为6、7，以面源污染和线源污染为主，占地面积为13431.9 hm²，占嵊州市域面积的7.51%。城镇和农村居民点的污染以生活垃圾和生活污水排放为主，排放强度大，可分别集中至垃圾填埋场和污水处理厂进行综合处理。交通运输场所以大气污染为主，车辆流动性强，排放强度大，影响范围广，较难控制。

(4) II级管控区。该区内的管控单元主要是耕地和园地这类农业生产空间，集成特征值为4，占地面积为66623.79 hm²，占嵊州市域面积的37.26%。耕地和园地的污染主要是水土流失影响下的农业面源污染，且在农业种植过程中会有少量的农业固废存在。

(5) I级管控区。该区内的管控单元主要是生态保护红线以外的林地、草地、水域、湿地等生态空间，集成特征值为0，占地面积为61525.17 hm²，占嵊州市域面积的34.41%。污染物主要来源于管控区外人类活动排放，管控区内无污染源，影响程度极小。

(6) ○级管控区。特殊管控区以生态保护功能为主，严格要求“零排放、零污染”。管控单元主要包括水源涵养区和水土保持区这两类生态保护红线，集成特征值为0，占地面积为36371.78 hm²，占嵊州市域面积的20.34%。

3.5 环境空间管控重点与治理对策

区域环境功能管控区划实现了环境污染源空间的分类和分等定级。针对嵊州市环境现状与高质量环境定性对标存在的问题，结合上文提出的6级管控区及主要管控单元类型，未来嵊州市实施环境污染源头管控的重点与对策如下。

(1) V级和IV级管控区重点推动工矿业生产空间和特殊生产空间的“三废”资源化。

V级管控区和IV级管控区是环境污染源空间管控的重中之重，管控单元包括垃圾填埋场、污水处理厂、工矿业生产空间和畜禽养殖场等，理应是政策配套和工程治理的直接对象。

垃圾填埋场和污水处理厂是固体废弃物和污水的集中集聚地，存在污染风险。针对垃圾填埋场，一是通过厌氧、填埋、焚烧等综合化的处理方式，最大程度无害化、资源化、高效化地完成生活垃圾处理，二是引进或研发“臭气”生物化学处理技术，解决异味弥散问题。污水处理厂应尽可能提高污水处理标准，尤其是针对印染厂的污水处理，使其能够符合河道水质要求，直接排放至江河湖海。

工矿业生产场所极易产生大量环境污染物，如SO₂、NO_x和工业固废等。针对这类污染源，亟需强化生产工艺环节的技术革新，对医药化工、印染造纸、家具涂装等高污染

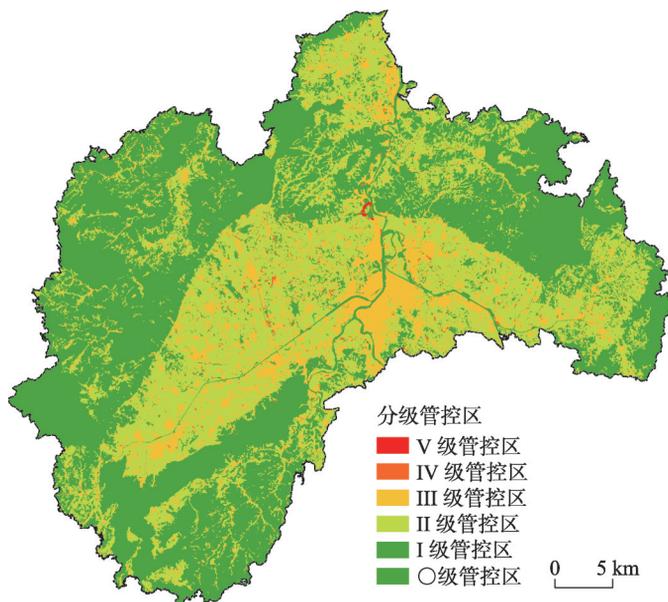


图7 嵊州市环境功能分级管控分区

Fig. 7 Environmental function management and control zoning in Shengzhou city

型的工业企业,执行特别排放限值,提高对水泥、电力等基础性产业的排放要求,鼓励通过“节能减排工艺+资源化利用”模式,减少废气、废水排放,提高固废的综合利用率。

畜禽养殖场因规模小、空间分布分散,一直是环境污染管控和治理的难点。针对该类污染源,亟需从严规范粪便和粪尿排放,建设“畜禽养殖场粪便快速肥化农牧对接模式示范工程”,并配置附属人工湿地和林木消纳地,最大程度保证“就地消纳”。

(2) III级管控区重点建设和完善生活空间内固废和污水的收集和治理工艺。

III级管控区的管控单元主要是城市、农村居民居住场所及交通运输场所。其中,城镇居民居住场所已有较为成熟的环境治理规范,未来可进一步完善固体废弃物分类—收集—储运—处理体系,通过“押金返还”等一系列创新制度,提高居民参与环境质量管控的积极性。

农村居民居住场所长期存在雨污混排、垃圾堆砌、污水处理设施不完善等问题。未来,一是加大农村居民点“雨污分流”工程推进力度,建设和优化生活污水治理终端工程;二是开展研发和示范,探索农村“雨污合流”混合处理新技术和新模式;三是设置农村垃圾中转站,将分散的生活垃圾集中收集至指定地点,并由转运车定期储运至垃圾填埋场。

交通运输场所是 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的主要排放地,其流动性强,可控性相对较弱。未来可进一步推动车辆结构升级,加快老旧柴油车淘汰,加强非道路移动机械污染管控。

(3) II级管控区重点解决农业生产空间的尾水处理和面源污染问题。

II级管控区以耕地、园地等农业生产空间为主,化肥施用和水土流水易导致地表水体的季节性富营养化。未来,嵊州市可开展农田(稻田)灌溉尾水“富营养化”污染物消纳示范,为地方农田灌溉尾水排放探索出一种污染物降减的新模式,主要做法是将农田排水区域周边未利用的土地,整治建设成尾水流经的人工湿地和消纳林木地。

(4) I级和○级管控区以保护为主,禁止自身人类活动,严防外界环境污染。

I级和○级管控区是生态空间,管控区内部无污染源头,应更多强调生态环境的保护。针对I级管控区,应按禁止开发区域进行管理,禁止大规模工业化和城镇化,禁止新建、扩建和改建各种对生态环境有较大负面影响的生产、开发建设活动。○级管控区为区域环境功能管控区划的底线,应与生态保护红线制度相匹配,实行最严格的环境保护制度,完全禁止人类活动,并杜绝外界人类活动的影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

源头管控和分区治理是环境空间精细化管治的基础。本文借鉴国内外环境空间管控的相关研究,针对固体废弃物、水体污染物和大气污染物的污染源头管控,提出了包括污染物与污染源识别、管控单元与管控区界定、污染源关键参数确定、污染物排放单项指标评价和综合集成等级类型划分在内的区域环境功能管控区划技术方法,并对浙江省嵊州市进行实证研究。

结果表明,嵊州市共有18个管控单元类型,按特征值高低及污染物排放特征可分别归类至V级、IV级、III级、II级、I级和○级管控区。V级管控区和IV级管控区是污染物集中排放场所,集成特征值分别为11和10,管控单元类型包括有垃圾填埋场、污水处理厂、高污染型工业场所、基础性工业场所、采矿区和畜禽养殖场,对水体、大气等影响

程度高,且存在一定危害性。Ⅲ级管控区的管控单元类型包括有城镇、农村居民居住场所以及交通运输场所,集成特征值为6和7,污染物排放量中等,影响水体和大气,存在少量危害性。Ⅱ级管控区的管控单元类型以耕地、园地等农业生产空间为主,集成特征值为4,有少量的固废和废水排放,存在面源污染风险。Ⅰ级管控区包括林地、草地、水域、裸地等生态空间,易受管控区外人类活动空间排放污染物的影响。○级管控区覆盖水源涵养区和水土保持区等生态保护红线范围,实施最严格的环境保护制度,强制要求零排放、零污染。

4.2 讨论

国家环境功能区划的空间单元是环境功能区,分区重点在于确定不同区域的主体环境功能,是环境管理走向源头控制的一项基础性尝试^[15,18]。本文提出的环境功能分级管控区划,重点解析了固废、水体和大气污染物的性质特点及其人类生产、生活空间来源指向,旨在从污染源入手实施污染物排放控制,而非仅面向水体、大气等受污染体。本文的区划方案将污染源空间分等定级,并根据区划方案制定管控力度与等级类型适配的政策规制体系,尤其是针对较为严重的农村污染源及大气污染源管控问题,提出相应对策和配套工程,力求将重点污染源管控到位。

本文以浙江省嵊州市为典型案例,开展县级层面的区域环境功能管控区划研究,能够为嵊州市制定中长期环境保护与发展规划提供一种新的路径,更能以此案例区为试点,为长三角区域乃至全国区域环境功能管控区划工作的全面开展提供技术方法支撑。本文仍存在研究局限和未来值得探索的内容:①水污染物和大气污染物存在流动性,本文未能定量测度重要管控单元的水体和大气污染影响范围,未来研究可进一步探索针对污染源的水体和大气污染物排放扩散影响模型,增加污染物扩散影响的定量评价指标;②工矿业生产空间组成复杂,不同行业的污染物排放特征不同,未来研究可根据案例地的实际情况,对工业空间的管控单元进一步细分,深入研究不同产业的污染源污染物排放问题。

参考文献(References)

- [1] Shi Hongying. Reflections on the relationship between environmental functional regionalization and main functional regionalization. *Energy and Energy Conservation*, 2019(1): 83-84, 118. [施红英. 环境功能区划与主体功能区划关系的思考. *能源与节能*, 2019(1): 83-84, 118.]
- [2] National Research Council of USA. *New Strategies for America's Watersheds*. Washington DC: National Academy Press, 1999: 1-36.
- [3] Innes J E, Connick S, Booher D. Informality as a planning strategy. *Journal of the American Planning Association*, 2007, 73(2): 195-210.
- [4] Hall O, Arnberg W. A method for landscape regionalization based on fuzzy membership signatures. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59(4): 227-240.
- [5] McLaren D, Bullock S. *Tomorrow's World: Britain's Share in a Sustainable Future*. London: Routledge, 1998.
- [6] Zhang Huiyuan. Preliminary conception of the framework system of environmental function zoning in China. *Environmental Protection*, 2009, 4(2): 7-10. [张惠远. 我国环境功能区划框架体系的初步构想. *环境保护*, 2009, 4(2): 7-10.]
- [7] Xu Kaipeng, Huang Yifan, Shi Lei. Enlightenment of the existing zoning evaluation to the environmental function zoning. *Environmental Protection*, 2010(14): 17-20. [许开鹏, 黄一凡, 石磊. 已有区划评析及对环境功能区划的启示. *环境保护*, 2010(14): 17-20.]
- [8] Xue Zhigang, Chai Fahe, Duan Ning, et al. Contents the tendency and strategy of acid rain and sulfur dioxide pollution control in two control zones. *Energy of China*, 2002 (11): 4-7. [薛志钢, 柴发合, 段宁, 等. “两控区”酸雨和二氧化硫污染控制的趋势和对策. *中国能源*, 2002(11): 4-7.]
- [9] Zhou Feng, Liu Yong, Huang Kai, et al. Water environmental function zoning at watershed scale and its key problems.

- Advances in Water Science, 2007, 18(2): 216-222. [周丰, 刘永, 黄凯, 等. 流域水环境功能区划及其关键问题. 水科学进展, 2007, 18(2): 216-222.]
- [10] Zeng Qingguo. Study on designation of I and II mixed areas of noise function division. *Arid Environmental Monitoring*, 1993, 7(2): 95-98. [曾庆国. 噪声功能区划中一类、二类混合区域的划定方法研究. 干旱环境监测, 1993, 7(2): 95-98.]
- [11] Chen Wenyong, Fang Dong, Xue Dazhi. Multi-factor scoring method for the division of atmospheric function zones. *Environmental Science and Technology*, 1998(1): 5-8, 29. [陈文颖, 方栋, 薛大知. 大气功能区划的多因子评分法. 环境科学与技术, 1998(1): 5-8, 29.]
- [12] Cai Jialiang, Yin He, Huang Yi. Ecological function regionalization: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3018-3027. [蔡佳亮, 殷贺, 黄艺. 生态功能区划理论研究进展. 生态学报, 2010, 30(11): 3018-3027.]
- [13] Wang Jinnan, Xu Kaipeng, Chi Yanyan, et al. The environmental function assessment and zoning scheme in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 129-135. [王金南, 许开鹏, 迟妍妍, 等. 我国环境功能评价与区划方案. 生态学报, 2014, 34(1): 129-135.]
- [14] Li Wangfeng, Lyu Chunying, Wang Zishu, et al. Research and application of "Three Lines and One List" in strategic environmental assessment of prefecture-level cities. *Environmental Impact Assessment*, 2018, 40(3): 14-18. [李王锋, 吕春英, 汪自书, 等. 地级市战略环境评价中“三线一单”理论研究与实践. 环境影响评价, 2018, 40(3): 14-18.]
- [15] Geng Haiqing. Analysis on the positioning of "Three Lines and One List" in the spatial planning system of China. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(5): 78-82. [耿海清. “三线一单”在我国空间规划体系中的定位浅析. 环境与可持续发展, 2019, 44(5): 78-82.]
- [16] Jiang Hongqiang, Liu Nianlei, Hu Xi, et al. Progress in research and practice of the ecological environmental space control system in China. *Environmental Protection*, 2019, 47(13): 32-36. [蒋洪强, 刘年磊, 胡溪, 等. 我国生态环境空间管控制度研究与实践进展. 环境保护, 2019, 47(13): 32-36.]
- [17] Xu Kaipeng, Chi Yanyan, Lu Jun, et al. Study on the progress and outlook of environmental function zoning. *Environmental Protection*, 2017, 45(1): 53-57. [许开鹏, 迟妍妍, 陆军, 等. 环境功能区划进展与展望. 环境保护, 2017, 45(1): 53-57.]
- [18] Wang Huijue, Zeng Defang, Chen Fangxian, et al. A new concept of pollutant sources and line of demarcation among road pollutant sources. *Environmental Protection in Transportation*, 1999, 20(1): 31-33. [王慧觉, 曾德芳, 陈方先, 等. 污染源概念和公路污染源界定. 交通环保, 1999, 20(1): 31-33.]
- [19] United States Environmental Protection Agency. Pollutant Emissions Summary Files for Earlier NEIs. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/pollutant-emissions-summary-files-earlier-neis>, 1990-07/2019-11-27.
- [20] United States Environmental Protection Agency. Interactive 2014 NEI Report and Data Exploration Tool. <https://gispub.epa.gov/neireport/2014/>, 2018-07/2019-11-27.
- [21] European Environment Agency. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. 3rd ed. 2001. https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2001_3, 2002-01/2019-11-27.
- [22] André M, Carteret M, Pasquier A. Traffic and vehicle fleet statistics for the calculation of air pollutant emissions from road transport in France//Michel A, Zissis S. *Energy and Environment*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2016: 417-433.
- [23] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(16): 6843-6902.
- [24] Gómez C D, González C M, Osses M, et al. Spatial and temporal disaggregation of the on-road vehicle emission inventory in a medium-sized Andean City: Comparison of GIS-based top-down methodologies. *Atmospheric Environment*, 2018, 179: 142-155.
- [25] Liu S H, Hua S B, Wang K, et al. Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Henan of China: Localized emission inventory, WRF/Chem simulations and potential source contribution analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 396-406.
- [26] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, et al. Influence of flue gas desulfurization (FGD) installations on emission characteristics of PM_{2.5} from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction (SCR). *Environmental Pollution*, 2017, 230: 655-662.
- [27] Xia Sijia, Liu Qian, Zhao Qiuyue. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 592-599. [夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献. 环境科学, 2018, 39(2): 592-599.]

- [28] Yan Dongjie, Ding Yifei, Yu Ya, et al. Inventory and reduction potential of anthropogenic PM_{2.5} emission in Xi'an City. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5): 813-820. [闫东杰, 丁毅飞, 玉亚, 等. 西安市人为源一次PM_{2.5}排放清单及减排潜力研究. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 813-820.]
- [29] Huang Yu, Hu Caijiao, Cheng Hairong, et al. Emission inventory and spatial distribution characteristics of particulate matters from dust source in Wuhan, China. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2018, 64(4): 354-362. [黄宇, 虎彩娇, 成海容, 等. 武汉市扬尘源颗粒物排放清单及空间分布特征. *武汉大学学报(理学版)*, 2018, 64(4): 354-362.]
- [30] Xue Yifeng, Yan Jing, Song Guangwu, et al. Establishment of an air pollutant emission inventory and uncertainty analysis. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2012, 25(2): 31-33. [薛亦峰, 闫静, 宋光武, 等. 大气污染物排放清单的建立及不确定性. *城市环境与城市生态*, 2012, 25(2): 31-33.]
- [31] Xuan Yingying, Chen Lin, Geng Hong, et al. Estimate and distribution analysis of NH₃ emission in Taiyuan. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(2): 176-179, 184. [宣莹莹, 陈霖, 耿红, 等. 太原市NH₃排放量估算及地域分布特征分析. *山西农业科学*, 2015, 43(2): 176-179, 184.]
- [32] Zhao Haiping, Li Qingxue, Tao Jianhua. Spatio-temporal water quality variations and identification of surface water pollutant sources in Bohai Bay. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(10): 21-30. [赵海萍, 李清雪, 陶建华. 渤海湾表层水质时空变化及污染源识别. *水力发电学报*, 2016, 35(10): 21-30.]
- [33] Wang Jingrui, Hu Litang. Advances in mathematical methods of groundwater pollution source identification. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 943-952. [王景瑞, 胡立堂. 地下水污染源识别的数学方法研究进展. *水科学进展*, 2017, 28(6): 943-952.]
- [34] Ma B, Jin M G, Liang X, et al. Groundwater mixing and mineralization processes in a mountain-oasis-desert basin, northwest China: Hydrogeochemistry and environmental tracer indicators. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(1): 233-250.
- [35] Shlomo P N. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. *Water Resources Research*, 1973, 9(4): 1006-1021.
- [36] Skaggs T H, Kabala Z J. Recovering the history of a groundwater contaminant plume: Method of quasi-reversibility. *Water Resources Research*, 1995, 31(11): 2669-2673.
- [37] Miao T S, Lu W X, Luo J N, et al. Application of set pair analysis and uncertainty analysis in groundwater pollution assessment and prediction: A case study of a typical molybdenum mining area in central Jilin Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(10): 1-15.
- [38] Snodgrass M F, Kitanidis P K. A geostatistical approach to contaminant source identification. *Water Resources Research*, 1997, 33(4): 537-546.
- [39] Gupta A, Kamble T, Machiwal D. Comparison of ordinary and Bayesian kriging techniques in depicting rainfall variability in arid and semi-arid regions of north-west India. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 1-16.
- [40] Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201. [樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [41] Xiong Shangao, Wan Jun, Lyu Hongdi, et al. Method to identify environmental management unit of "ecological protection red line, environmental quality baseline, resource utilization upper limit and ecological environmental access list": A case study of Jinan City. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(6): 731-736. [熊善高, 万军, 吕红迪, 等. "三线一单"环境管控单元划定研究: 以济南市为例. *环境污染与防治*, 2019, 41(6): 731-736.]
- [42] Ren Jianxin, Li Shuang, Ma Huiqiang, et al. Ecological function regionalization of Fushun City, Liaoning Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 161-167, 173, 353. [任建新, 李爽, 马会强, 等. 辽宁省抚顺市生态功能区划. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 161-167, 173, 353.]
- [43] Xu Jieyu, Wang Zishu, Mao Lei, et al. Research on the environmental control mechanism based on "Multiple Plans Integration" spatial planning. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(5): 83-85. [许杰玉, 汪自书, 毛磊, 等. 基于"多规合一"空间规划的环境管控机制研究. *环境与可持续发展*, 2019, 44(5): 83-85.]
- [44] Rao Yao, Tong Hongjin, Yu Tao, et al. Analysis and countermeasure research on the source of water pollution in Luxian County Section of Laixi River Basin. *Sichuan Environment*, 2017, 36(3): 60-65. [饶瑶, 佟洪金, 余涛, 等. 濛溪河流域泸县段水污染源分析及对策研究. *四川环境*, 2017, 36(3): 60-65.]
- [45] Liang Shijun, Huang Yinchun, Yin Peng. Analysis and countermeasures research on the sources of water pollution in Yixing River Basin. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(10): 91-93, 96. [梁时军, 黄银春, 尹鹏. 义兴河流域水污染源分析及对策研究. *绿色科技*, 2019(10): 91-93, 96.]

Technical method and application of the regional environmental function management and control zoning

CHEN Yufan^{1,2}, XU Yong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Environmental governance plays a pivotal role in promoting the high-quality development of environment, and the implementation of source control and zoning management is the foundation of the refined governance of environmental space. This paper aims to put forward the theoretical and technical methods of regional environmental function management and control zoning, and carry out an empirical study on Shengzhou city, Zhejiang province. First, a spatial structure model of the environmental pollution sources (EPSs) for human activities, which is composed of control units (CUs) and hierarchical control areas (HCAs), has been formed and identified. Then, the solid waste, air pollutants and water pollutants are selected as the main pollutants, and the single evaluation and weighted sum have been measured for each CU. Finally, according to the spatial classification of the CUs and the integrated eigenvalues, key countermeasures and supporting projects of each HCA are proposed. The main results are as follows: (1) Shengzhou city has a total of 18 CUs, which can be divided into 6 HCAs. HCAs of levels V and IV are the areas where pollutants are discharged intensively, with integrated eigenvalues of 11 and 10 respectively. The CUs, including refuse landfill, sewage-treatment plant, high-pollution industrial zone, livestock and poultry farm, mining area, and basic industrial zone, have huge impact on water and atmosphere, and have great hazards. It is necessary to promote the resource utilization of industrial and mining production space in the key area of environmental governance. (2) The emissions of pollutants in the HCAs of levels III and II are medium or even less. The CUs of level-III HAC cover urban settlements, rural settlements and transportation land, with integrated eigenvalues of 6 and 7. It is important to improve the collection and treatment technology of solid waste and sewage in all living space. In addition, HAC of level-II includes two CUs, which are cultivated land and garden plot, with integrated eigenvalues of 4. It has a small amount of agricultural solid waste and sewage discharge, therefore, it is urgent to solve the problems of non-point source pollution and eutrophication. (3) HCAs of level-I is composed of forest land, garden land, water area, bare land and other ecological space, with more emphasis on ecological protection function. Large scale industrialization and urbanization are prohibited in the area. HAC of level O highly overlaps ecological redline, which requires complete prohibition of human activities and the elimination of external environmental impact.

Keywords: regional environmental function; control unit; hierarchical control area; environmental pollution source; Shengzhou city