

青藏高原环境污染胁迫解析及 垂直化空间管控体系构建 ——以西藏自治区为例

陈妤凡^{1,2,3}, 周侃^{4,5}, 徐勇^{4,5}

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 浙江省陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211; 3. 浙江省新型重点专业智库宁波大学东海研究院, 宁波 315211; 4. 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; 5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 准确判别污染源及其空间胁迫过程, 并基于胁迫规律构建精准化管控体系是保障青藏高原生态环境安全的重要切入点。以西藏自治区为例, 结合土地利用和污染行为重构污染源空间, 运用改进后的排放因子法分源、分要素精准测度污染胁迫程度及其空间效应, 并构建垂直化的环境空间管控体系及多维分区方案。研究表明: 西藏自治区极有限的人为污染源空间承载有骤增的多种污染物排放, 污染源空间结构的复杂性与胁迫程度呈正相关。以固体废弃物排放为主的高胁迫集中在重点城市和“一江两河”腹心地区的生活源空间, 且在城乡居住空间、交通运输场所及工矿生产场所呈块状、线状和点状的空间胁迫形态。以近零胁迫为目标, 可在县域、镇域和场址共三个尺度分别空间聚类得到四个环境功能区、五个分级管控区及四个胁迫程度区, 自上而下实现功能管控、结构管控和用途管控。建议将面向污染源空间的垂直化管控体系融入至国土空间利用和国土空间用途管制体系, 在三个尺度分别适配环境正负面清单、均衡化环境基础设施及产污控制标准, 以提高青藏高原的生态环境精准化管控效能。

关键词: 环境污染源; 环境胁迫; 环境空间管控; 垂直体系; 青藏高原

青藏高原是中国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地和高寒生物种质资源宝库^[1], 但也因最特殊的地理构造, 其自然生态系统具有高度生态敏感性和脆弱性, 可利用土地严重受限。在局部地区负载有高密度的人类活动, 经高强度损害后具有不可逆转性^[2]。随着交通网络建设及外来人口涌入, 环境污染物随之空间扩散且不易精准预测, 对高原生态环境系统稳定性造成更大冲击^[3,4]。环境污染胁迫一般是以人为主体, 可以看作是是人类活动向生态环境系统排放污染物并产生综合压力的过程^[5]。已有研究多是聚焦于环境污染胁迫的影响因素及空间效应, 以人类活动比较剧烈的东部沿海地区或中西部城市群地区为主, 发现工业化和城市化主导下的人文社会经济因子是主要驱动因素^[6-9]。在青藏高原这类重点生态功能区, 关于环境污染的研究侧重于土壤或大气等环境受体的污染要素评估^[10-12], 从人类活动强度视角出发则更多是探讨其时空格局、影响因素及对生态环

收稿日期: 2023-03-27; 修订日期: 2023-06-27

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0406); 国家自然科学基金项目 (41971164, 42230510)

作者简介: 陈妤凡 (1994-), 女, 浙江舟山人, 博士, 讲师, 研究方向为环境经济地理与空间治理。

E-mail: chen_yufan@nbu.edu.cn

通讯作者: 周侃 (1986-), 男, 云南丽江人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为资源环境承载力与空间治理。E-mail: zhokan2008@126.com

境系统造成的影响^[13-15],环境胁迫的直接定量化研究整体偏少^[16-18]。因此,科学解析青藏高原环境污染的多要素胁迫过程,构建全覆盖、多尺度、垂直化的环境空间管控体系,从源头杜绝污染胁迫,有助于降低人类活动对高原生态环境系统的影响,以环境系统的近零扰动稳定生态系统的循环服务功能。

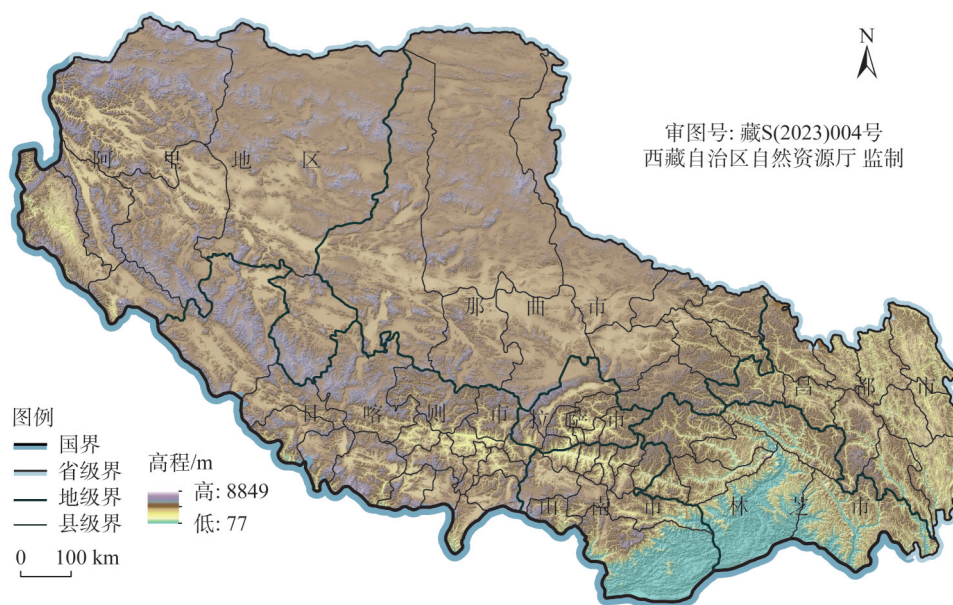
污染产生量测算是胁迫过程评价的前提,一般按污染物类型或污染源类型进行区别研究。固体废弃物的定量计算多是通过抽样实测、问卷调查、数字模型预测等方面获取主要参数,或直接通过统计数据获取后合并整理^[19-22];水污染和大气污染常是以排放清单作为主要技术手段^[23,24],针对点源、线源和面源等多形态污染源,通过直接监测或输入系数法、SWAT、HSPF等方法评估污染负荷^[25-27],并运用受体模型、扩散模型、反向追踪等方法识别污染物具体成分及源头位置^[28-31]。尽管污染数据在空间尺度已能实现到企业、居民点等点位单元,但评价或统计尺度仍是停留在国家、区域/流域或省市行政单元。在评价基础上,现有研究通过区划的形式,结合其他指标对区域进行分区控制和分类管理,这也是目前体现区域环境差异化管控的最好方法^[32]。水环境空间管控由自然区划过渡到生态区划,当下的水环境功能区划是以水化学特征指标为参考,注重水体环境的污染控制和容量保护^[33-35];大气环境空间管控偏向于单一要素管控或功能导向管控,以环境质量为主要指标划分不同类型的功能区,执行不同等级的防治政策^[36-38];综合性的空间管控区划,例如环境功能区划、“三线一单”、主体功能区规划、国土空间规划等,则是将环境保护作为国土空间分区管理的重要目标,统筹考虑社会经济发展、自然资源禀赋及其他功能差异,构建合理的生态环境分区管控体系及空间方案^[39-43];其他要素区划,例如生态功能区划^[44,45]、声环境功能区划^[46]、土壤环境功能区划^[47]等,也证明分区管理模式能够在揭示空间分异规律基础上提高环境精准管控能力。

总体来看,通过建立环境污染物排放清单,自下而上测算各种排放源在一定时间跨度和空间区域的污染排放已属于相对成熟的评价方法;面向复合要素或复杂系统,环境空间管控也由单要素区划逐步尝试向区域性综合区划转型。在青藏高原等典型高寒生态安全屏障区开展污染胁迫过程解析具有紧迫性和必要性。本文以西藏自治区为例,基于其生态环境本底的特殊性及其与人类活动的交互关系,融合土地利用覆被、环境污染调查、社会经济统计等多源异构数据,以污染胁迫程度为基本指标,从污染源及污染物类型分解具体污染胁迫过程,将管控单元由宏观行政区逐步缩小至微观污染源空间,形成适应多尺度传导效应、兼顾不同环境规制目标的环境空间管控方案,强化垂直化空间管控体系在高寒生态安全屏障区的管控效能。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原东西长约2800 km,南北宽约300~1500 km,总面积为258.23万km²,是中国最大、世界海拔最高的高原,被称为“世界屋脊”“地球第三极”。青藏高原作为中国重要的生态安全屏障区,在全国“两屏三带”生态安全战略中占据重要地位。青藏高原在中国境内覆盖西藏自治区全域以及青海、新疆、四川、云南、甘肃的部分区域,本文以西藏自治区全域为研究区(图1),包括拉萨市、日喀则市、昌都市、林芝市、山南市、



注：本图基于西藏自治区自然资源厅标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 西藏自治区地理环境图

Fig. 1 Geographic environment of Tibet Autonomous Region

那曲市、阿里地区共7个地市，下辖8个市辖区、66个县，全区总面积122.84万 km^2 。西藏自治区地势复杂，总体呈西高东低的分布特征，边缘起伏度高，内部起伏度相对较低；平均海拔远高于同纬度周边地区，海拔4000 m以上地区占全区总面积的86.1%，山脉、河流、湖泊、冰川等数量多、分布广。青藏高原生态环境系统敏感且脆弱，自我调节和修复能力较差。近年来，随着基础设施建设及外来人口涌入，复杂的生产生活活动对生态环境系统的干扰破坏正在逐步制约青藏高原地区的可持续发展。2020年，西藏自治区总人口共366万人，城镇化率仅35.73%，地区生产总值在1902.74亿元，经济增长主要集中在农牧业生产和旅游休闲产业。在污染物排放方面，全区化学需氧量、氨氮、二氧化硫和氮氧化物等主要水气污染物的产生量分别为53.05万t、0.51万t、0.57万t和5.39万t，一般工业固体废弃物产生量和生活垃圾清运量分别为1940万t和62.3万t。应用于其他工业化、城市化地区的传统环境空间管控体系并不适用于青藏高原生态安全屏障区，亟需探索更具针对性的方法以应对日益复杂的胁迫特征及剧增的管控压力。

1.2 研究方法

1.2.1 污染源空间匹配及污染行为识别

本文通过土地利用重分类为各个土地利用类型赋予环境属性，主要是依据土地利用现状分类（GB/T 21010-2007），并参考城市用地分类与规划建设用地标准（GB 50137-2011）、第一次全国地理国情普查地表覆盖分类方式（GDPJ01-2013）等分类标准^[48]，结合污染胁迫特征的同质性和相似性，借助人工矢量化、监督分类等方式将原有的土地利用斑块提取并重新分类，进一步确定与各个污染源相匹配的空间单元。根据第二次全国污染源普查的分类标准，西藏自治区可提取得到工业源、农业源、生活源、集中式污染

治理设施和移动源共五种污染源类型。结合各类污染源的概念、分类标准及普查对象,进一步匹配与之相适应的土地利用空间单元,并在已有的土地利用分类基础上进行合并与重分类,并将该空间单元作为后续污染胁迫程度评价及空间分区的基本单元(表1)。

1.2.2 基于改进后排放因子法的单要素污染胁迫程度评价

单要素污染胁迫程度是指从固体废弃物、水污染和大气污染等三个侧面反映不同空间单元所承载的复杂污染行为对空间载体或区域生态环境系统造成的污染胁迫及其所排放的污染物数量。根据排放因子法的计算原理^[49],首先需确定不同污染行为的污染客体数量以及胁迫系数(分为原始系数和污染处理控制后的更新系数),基本公式如下:

$$EM_{i,l} = \sum_{j,k} A_{ij,k} \times EF_{j,l} \times \beta_{j,l} \tag{1}$$

式中: EM 为各个空间单元的单要素污染胁迫程度(污染物排放量); EF 为原始胁迫系数; A 为胁迫客体数量(个); β 为调整系数; i 为污染源空间类型; l 为污染物类型; j 为人为污染行为; k 为胁迫客体类型。此外, $\beta_{j,l}$ 根据污染行为及空间属性不同,可进一步演变为如表2所示的若干形式,主要应用于大气污染胁迫测算。

需要说明的是,排放因子法使用的各项排污系数,是基于西藏自治区主要污染物性质、人为污染行为及污染胁迫客体,参考已有研究成果^[18,50]以及全国污染源产排污系数手册,并对比分析近年来西藏自治区的环境影响评价报告和环境统计年鉴后二次修正得到。计算结果与自治区的环境统计数据对比,两者的相对误差控制在5%以内,测算精度满足评价分析及空间分等定级需求。

1.2.3 基于对称性赋权法的环境污染胁迫综合指数计算

首先,运用最大最小值法完成数据标准化,得到各个空间单元的单要素污染胁迫指

表1 污染源空间匹配及污染行为
Table 1 Spatial matching of pollution sources and their pollution behavior

空间单元	污染源	污染行为
生产空间	工矿生产空间	工矿企业从事工矿业生产及经营活动产生污染排放
	农牧生产空间	农业种植、畜禽养殖及水产养殖过程产生污染排放
生活空间	城乡居住空间	本地居民日常生活直接产生污染或使用能源造成二次污染排放
	休闲游憩空间	游客进入后直接产生污染或使用能源造成二次污染排放
	交通运输空间	机动车、非道路移动设施行驶过程产生污染排放
	污染治理空间	集中式污染治理设施 处置生活垃圾、危险废物或污水过程产生污染排放
生态空间	非人为污染源	原则上不允许有人为自主污染行为

表2 排放因子法调整系数的演化形式及适用性
Table 2 Forms and applicability of adjustment coefficient of emission factor method

演化形式	变量解释	污染行为
$\beta_{j,l}$	$\sum_z (1 - \delta_z)$ δ 为污染去除效率; z 为污染控制措施	燃料燃烧
	$\sum_m VKT_m$ VKT 为机动车年均行驶里程数(km); m 为机动车类型	交通移动
	$(1 - \frac{n}{365})$ n 为不起尘天数(天)	扬尘堆积
	$\sum_q U_q$ U 为标准猪转换系数; q 为畜禽类型	畜禽养殖
	$\sum_r W_r$ W 为不同氮肥的生产比例; r 为氮肥类型	农业种植

数 (Z_{ij}), 数值分布在 [0, 1];

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}^j}{x_{\max}^j - x_{\min}^j}$$

(2)

其次, 考虑到不同形态和类型的污染物对生态环境系统造成的胁迫程度及重要性不同, 以数值变异程度作为参考, 利用对称性赋权法^[51]计算客观指标权重 (W_j), 并结合实际调研情况及专家意见, 调整得到实际指标权重 (表3);

$$W_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}}{\bar{x}_j}$$

(3)

最后, 将无量纲化处理后得到的单要素污染胁迫指数与权重相结合, 综合得到每个空间单元的环境污染胁迫综合指数 (P_i), 作为多尺度分区分级的基本参照指标。

$$P_i = \frac{\sum Z_{ij} \times W_j}{\sum W_j}$$

(4)

表3 单要素污染胁迫指标的权重值

Table 3 Weight value of single factor pollution stress index

固体废弃物胁迫指标				水污染胁迫指标				大气污染胁迫指标			
生活垃圾	工业固废	农业固废	化学需氧量	氨氮	总氮	总磷	二氧化硫	氮氧化物	颗粒物	挥发性有机物	
权重	1.998	2.000	2.000	1.229	1.688	1.224	1.265	1.656	1.503	1.227	1.392

1.2.4 环境空间管控分区方案的综合集成

考虑到生态安全屏障区的整体环境污染胁迫程度较低, 为能够精准管控以实现近零胁迫的目标, 现构建“县域尺度—镇域尺度—场地尺度”全覆盖、多尺度、垂直化的西藏自治区环境空间管控体系, 并依托 ArcGIS 平台实现具体分区方案的可视化。其中, 县域尺度将以功能属性为主导, 融合优化开发、重点开发、农产品生产、生态保护等主体功能类型以及县域平均污染胁迫综合指数, 将西藏自治区的 74 个区县空间聚类为四个环境功能区, 旨在确定各个区县的主导环境功能类型与环境管控目标, 制定环境管控的正负面清单。镇域尺度将基于所属县域的环境功能类型, 结合镇域平均污染胁迫综合指数及环境污染胁迫特征, 将 676 个乡镇(街道)划分为五个分級管控区, 旨在确定各个乡镇的环境管控强度与管控等级, 匹配具体的环境治理模式。场地尺度则是依托空间重分类完成的污染源空间类型分布, 明确各个镇域内部所覆盖的污染源空间属性及综合胁迫程度, 识别得到高值、中值、低值和零值共四个胁迫程度区, 旨在精准管控污染行为与土地用途。

1.3 数据来源

研究数据包括四个部分: (1) 地理空间类数据, 具体指省、市、县行政区划数据 (2020 年), 来源于全国地理信息资源目录服务系统中的 1:100 万全国基础地理信息数据库 (<https://www.webmap.cn>); 数字高程模型数据 (2020 年), 来源于 NASA Earthdata (<https://earthdata.nasa.gov>), 栅格大小重采样为 30 m; 土地利用遥感监测数据 (2020 年),

来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn>), 栅格大小为 30 m。
(2) 生态环境类数据, 具体指工业污染源、农业污染源、生活污染源、集中式污染治理设施和移动源的普查对象、数量、分布、排污情况及排污系数, 来源于西藏自治区第二次污染源普查报告 (2018 年); 固体废弃物、水体污染物和大气污染物的产生量以及环境处理设施的分布和处理利用情况, 来源于西藏自治区的环境统计公报 (2015 年/2020 年)、环境质量报告书 (2015 年/2020 年) 以及地方统计年鉴 (2015 年/2020 年)。
(3) 经济社会类数据, 具体指地区环境污染胁迫程度计算所涉及的人口数量及结构数据、经济总量及结构数据、农牧业生产数据、工业生产及能源消耗数据、旅游情况及其他公共服务相关数据等, 来源于西藏自治区的第四次经济普查报告 (2020 年)、第七次全国人口普查主要数据公报 (2020 年)、地方统计年鉴 (2015 年/2020 年) 以及国民经济和社会发展公报 (2015 年/2020 年) 等。
(4) 实地调研数据, 作者于 2021 年前往西藏自治区开展实地考察与地方座谈, 补充了部分缺失数据, 并建立相对完整的研究数据库。

2 结果分析

2.1 环境污染胁迫的总体特征

基于主要污染物排放量评价西藏自治区的单要素环境污染胁迫程度及时空变化。由图 2a 可知, 全区环境污染胁迫程度整体较低, 胁迫类型以固体废弃物胁迫为主, 水和大气污染胁迫相对可控, 但各要素的污染胁迫程度呈加剧趋势。其中, 固体废弃物胁迫主要是由于周边人口集聚及外来游客涌入等导致的生活垃圾排放增加, 2015—2020 年年均增长率为 36.9%; 工业固体废弃物排放量以年均 215% 的速度迅速增长, 区域工业生产规模扩大, 产业结构有所调整。水污染胁迫呈小幅上升趋势, 主要体现在化学需氧量排放方面, 年均增长率为 43.9%, 氨氮、总氮、总磷等其他水污染物指标相对稳定。大气污染胁迫亦呈现持续快速上升趋势, 主要污染物的年均增长率均值高达 291.4%, 日常生活和工业能源消耗产生大量二氧化硫和颗粒物, 以及交通线路建设带来的运输量增加也导致氮氧化物的大幅增加。

图 2b 进一步体现了西藏自治区环境污染胁迫与全国平均水平的差异。尽管西藏自治区自身的环境污染胁迫呈加剧趋势, 但整体相较全国平均胁迫水平仍有巨大差距, 在全

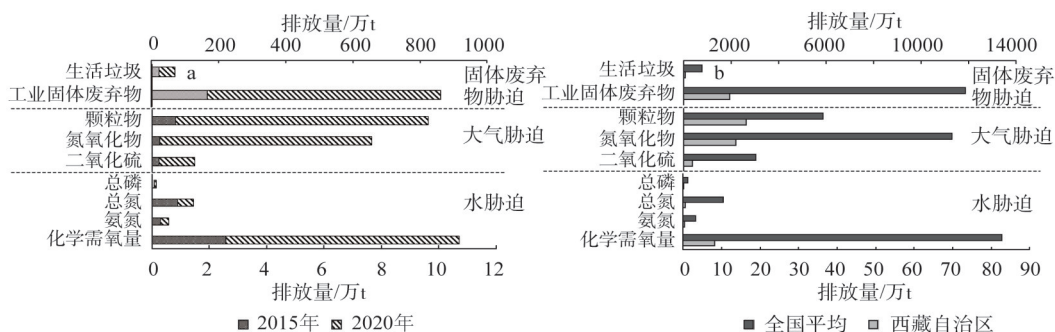


图2 西藏自治区单要素污染胁迫的总体特征

Fig. 2 Characteristics of single factor pollution stress in Tibet Autonomous Region

国仍属于低胁迫区域，受藏区的生产生活方式影响，固体废弃物是主要胁迫类型。由胁迫集中度可知，拉萨市、日喀则市等人口规模大且工农产业较为集中的重点区域环境污染胁迫程度最高，各类污染物排放量合计占比大多超过 50%，污染源类型复杂且数量较多，藏东南的生态安全屏障区以及藏北地区的环境污染胁迫程度相对较低。

2.2 环境污染胁迫的多要素胁迫过程

2.2.1 生产源空间的单要素污染胁迫过程

根据表 1 的污染源分类及污染行为识别，西藏自治区的生产源空间可基于土地利用重分类匹配为工矿生产空间和农牧生产空间。由图 3a 可知，工矿生产空间依托工业园区、工业厂房、矿山等点状要素以局部集中的形式分布在各个地市的城区或镇区，因工业产品生产、矿产资源开发利用或其他能源燃烧等污染行为造成的多要素、复杂化、高强度的环境污染胁迫。有机水污染和大气污染的代表性指标化学需氧量和颗粒物的排放量分别 0.12 万 t/a 和 5.16 万 t/a，固体废弃物排放则超过 600 万 t/a。

农牧生产空间因藏区农牧生活方式的特殊性呈现两种分布形态（图 3b）：一是集中连片式的耕地、园地等农业种植区，以及规模化的畜禽养殖场及水产养殖场，一般呈现出空间面积大但地均污染强度低的污染胁迫特征；另则为零散分布的、自由式的游牧生产点，呈现空间分散、强度低且可控性弱的污染胁迫特征。农牧业生产活动造成的污染

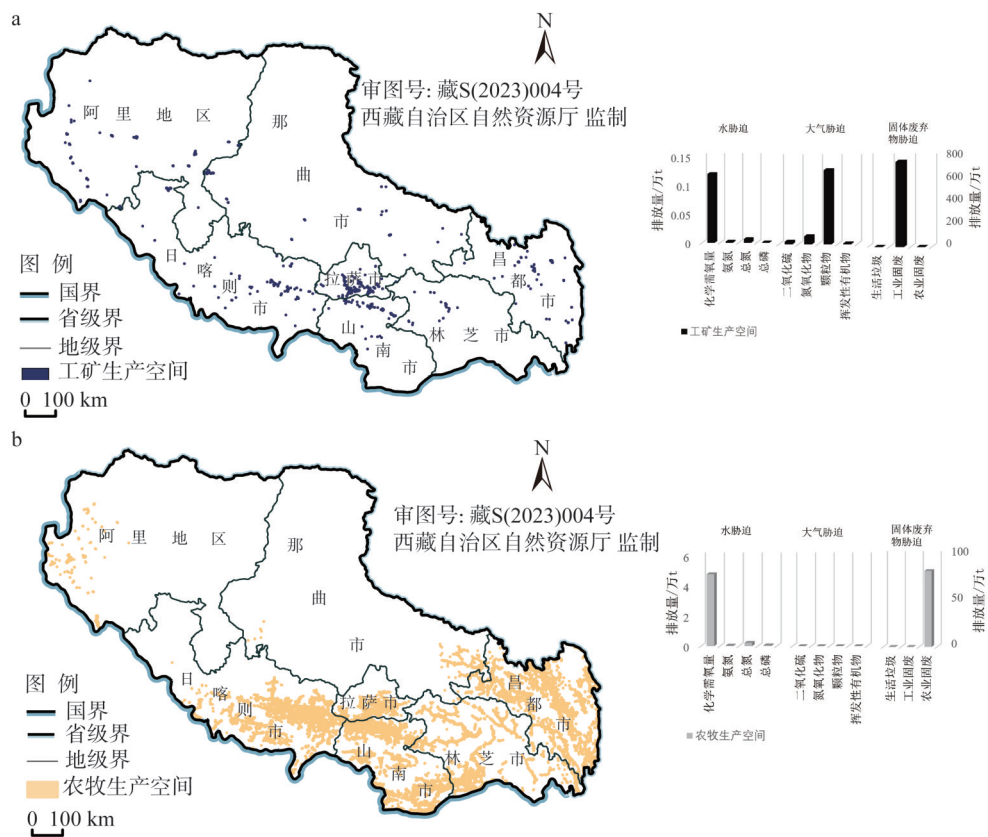


图3 西藏自治区生产源空间的分布形态及污染胁迫程度

Fig. 3 Distribution pattern and pollution stress degree of production source space in Tibet Autonomous Region

胁迫主要集中在水污染方面,其中畜禽养殖导致的胁迫占比高达95%,农业种植后水土流失造成的胁迫占比低于3%,农业固废产生量则与其秸秆利用率和地膜回收率有关。

2.2.2 生活源空间的单要素污染胁迫过程

西藏自治区的生活源空间可进一步划分为城乡居住空间(包含休闲游憩空间)、交通运输空间和污染治理空间。受藏区生活模式及经济生产方式影响,生活源对生态环境系统产生的水气污染胁迫整体与生产源基本持平,固体废弃物胁迫因污染类型不同差距较大(图4)。其中,城乡居住空间以块状聚落形式集中分布在各个城市和镇区的中心区域,以及以点状零散分布在靠近交通线路及宗教场所的位置,因原住民日常生活活动造成的大气污染胁迫和水污染胁迫程度都相对较高,且受游客影响,部分景区集中地区的污染胁迫存在明显季节性。交通运输场所主要以线状或网格状穿插在其他空间单元之间,其产生源主要是负载的机动车、农业机械、工程机械等,故具有较强的空间流动性,且主要是对大气环境造成较高程度的污染胁迫。污染治理空间则是以点状形式分布在各个城市的固定选址区域,主要承担城区和乡镇集中化的垃圾与污水处理,常因处理工艺等客观因素对生态环境产生微量的二次污染胁迫。

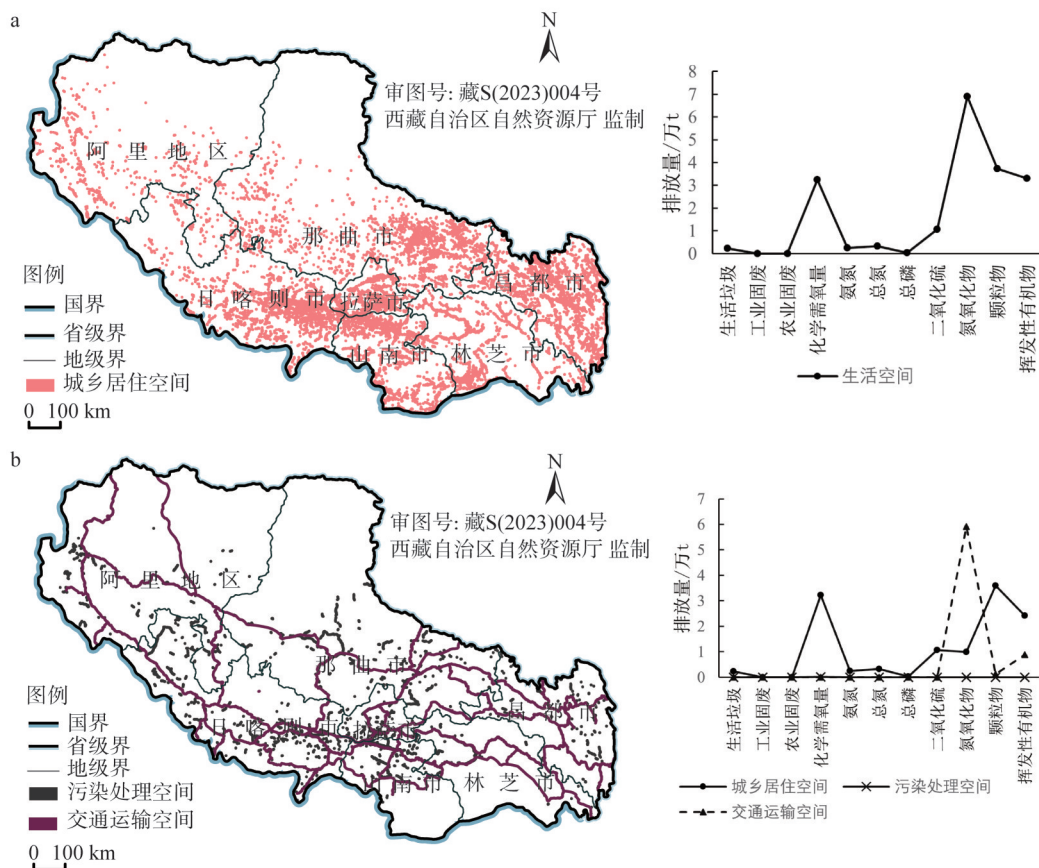


图4 西藏自治区生活源空间的分布形态及污染胁迫程度

Fig. 4 Distribution pattern and pollution stress degree of living source space in Tibet Autonomous Region

具体分析生活源下各项污染行为的单要素污染胁迫特征，西藏自治区城镇化率仅35.73%，居民家庭的生活能源使用以人工煤气、液化石油气及锅炉燃煤为主，大多家庭尚未完成天然气或电力改造以及厕所类型改造，直接导致主要水气污染物的排放量占比均在40%以上，尤其是氨氮和二氧化硫排污量的占比甚至高达85%以上。机动车行驶造成的道路源排放主要体现在氮氧化物、颗粒物和挥发性有机物三个指标上，占全区排放比例分别为53.67%、39.34%和68.37%。在常规污染处理工艺下，垃圾处理场和污水处理厂造成的污染胁迫程度整体较低，排污量占比低于1%，基本可忽略不计。

2.2.3 污染源空间的多要素综合胁迫过程

将标准化后的单要素污染胁迫程度和表3的权重值相结合，计算得到各个污染源空间的固体废弃物胁迫指数、水污染胁迫指数、大气污染胁迫指数及综合胁迫指数，如表4所示。

表4 西藏自治区污染源空间的环境污染胁迫指数					
Table 4 Environmental pollution stress index of pollution source space in Tibet Autonomous Region					
	工矿生产空间	农牧生产空间	城乡居住空间	污染处理空间	交通运输空间
固体废弃物胁迫	0.3334	0.3334	0.3332	0.0002	0.0000
水污染胁迫	0.0166	0.6513	0.8324	0.0088	0.0000
大气污染胁迫	0.2923	0.0000	0.7189	0.0001	0.3530
综合胁迫指数	0.2199	0.3213	0.6199	0.0029	0.1187

结合污染源的空间结构，城乡居住空间所承载的污染行为对西藏自治区的生态环境系统胁迫程度最高，综合胁迫指数为0.6199，远高于其他空间单元；工矿生产空间和农牧生产空间所造成的污染胁迫程度次之，综合胁迫指数分别为0.2199和0.3213，但主要胁迫类型有所区别；交通运输空间仅对大气环境造成的污染胁迫程度较高；污染处理空间对地区生态环境有微量的污染胁迫。结合污染物类型，固体废弃物胁迫较为均衡的集中在工矿生产空间、农牧生产空间和城乡居住空间；水污染胁迫则主要集中在农牧生产空间和城乡居住空间；大气污染胁迫主要集中在城乡居住空间、交通运输空间和工矿生产空间，这与生活生产过程中的能源消费结构有关。最后对比各个地市的平均胁迫程度可以发现，经分源计算与空间统计后的地市分级结果，与环境普查数据的统计结果基本一致，平均胁迫程度依次为拉萨市>>山南市>日喀则市>昌都市>林芝市>>那曲市>阿里地区，指标值分界点分别为0.05与0.01。

2.3 环境污染胁迫空间管控的垂直化分区方案

2.3.1 县域尺度:环境功能类型区

在省域尺度，西藏自治区的污染源空间可结合土地用途和污染属性，归类为6类生产生活源空间以及2类生态源空间。但在环境精准管控的目标下，收缩至县域或镇域尺度，污染源空间可进一步重分类和空间识别出共13个类型，空间分布如图5所示。根据式（2）~式（4），可计算得到13类污染源空间的综合胁迫指数，并作为基础指标用于三个尺度的分区处理。

叠加西藏自治区的行政区划及污染源空间的综合胁迫指数，得到74个区县的平均污染胁迫程度，再结合县域主体功能可将所有区县分为四种环境功能类型区，分别为生活

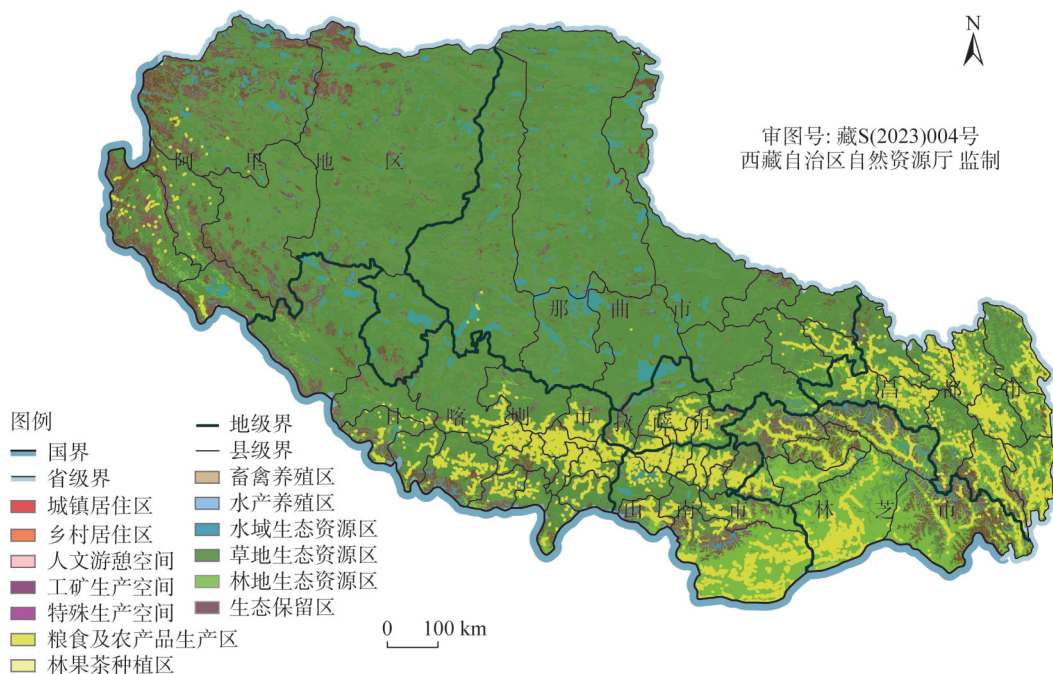


图5 西藏自治区污染源空间的类型分布

Fig. 5 Spatial distribution of pollution source spaces in Tibet Autonomous Region

一工业源胁迫主导的城市开发区、生活—农业源胁迫主导的农牧发展区、生态—农业源胁迫主导的生态保育区以及近零胁迫的生态保护区, 如图6所示。

隶属于生活—工业源胁迫主导的城市开发区的区县共11个, 主要位于拉萨市、日喀则市和山南市等重点城市的市政府驻地及周边重点区域, 集聚有规模化的工矿生产空间、城乡居住空间及污染处理空间, 并通过树状交通运输空间相互串联, 污染胁迫类型复杂且强度较大, 平均污染胁迫指数为0.0213。隶属于生活—农业源胁迫主导的农牧发展区的区县共32个, 主要分布在日喀则北部、山南东北部、林芝西北部、昌都南部以及那曲东部, 在河谷地带有城乡居住空间和工矿生产空间呈线状分布, 另有连片式的农牧生产空间由点向面逐步分散式分布, 从而呈空间分散且强度较高的污染胁迫, 平均胁迫指数为0.0028。隶属于生态—农业源胁迫主导的生态保育区的区县共18个, 主要分布在各个城市的外围地区, 在生态空间基础上穿插有连片状的农牧生产空间, 另在镇区中心拥有较为集中的城乡居住空间, 整体的污染胁迫程度相对较低, 平均指数为0.0014。隶属于近零胁迫的生态保护区的区县共12个, 主要分布在那曲市西部和阿里地区, 因自然本底条件限制, 区域内部被大面积的生态空间所占据, 基本无人为污染物排放, 平均污染胁迫指数仅0.0007。

2.3.2 镇域尺度: 环境分级管控区

基于环境功能类型分区结果, 赋予各个县域环境功能控制系数, 并将其与各个乡镇的平均污染胁迫程度空间叠加, 进一步确定自治区676个乡镇的环境管控指数, 参考Jenks自然断裂法, 按管控指数 >0.1 、 $0.05\sim 0.1$ 、 $0.01\sim 0.05$ 、 $0.005\sim 0.01$ 和 $0\sim 0.005$ 的分类,

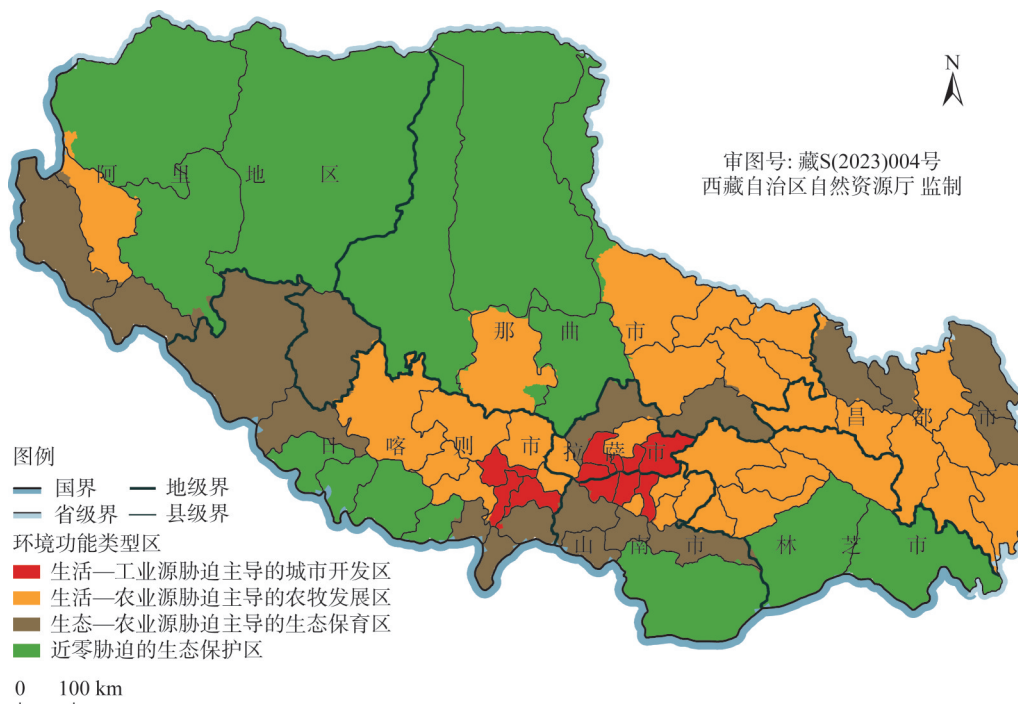


图6 西藏自治区县域尺度的环境功能类型区空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of environmental function zones at county level in Tibet Autonomous Region

区间由高到低分为V级管控区、IV级管控区、III级管控区、II级管控区和I级管控区，数量依次为12个、19个、125个、101个和419个，不同的管控区对应不同的管控强度以及具体的管控需求和治理模式。

由图7可知，整体上西藏自治区全区23.08%的乡镇需要中高强度管控，其相较于全国其他地区尚未有较大的管控压力。中高强度管控区（V级、IV级、III级）主要分布在各个驻地镇及邻近乡镇，尤其是在拉萨市、日喀则市和山南市的部分重点县域中心，呈现出一定的空间集聚性；低强度管控区则以点一面状结合的形式，分散在全区各地，且在藏北地区更加集中。表5进一步统计各个功能类型区内部各个分级管控区的数量和分布情况，生活—工业源胁迫主导的城市开发区，负载有大量类型复杂且环境胁迫强度高的人类活动，内部集聚了绝大部分的V级和IV级管控区，中高强度管控区占比为71.96%。生活—农业源胁迫主导的农牧发展区，人类活动以原住民的日常生活和农牧生产为主，内部有19.75%的乡镇需要IV级和III级管控，与其中等水平的污染胁迫程度较为匹配。生态—农业源胁迫主导的生态保育区，受自然本底条件约束，人类活动较少产生在该区域，因此内部的管控区以II级和I级为主，占比高达90.07%，剩余的中高强度管控则主要是针对典型的农牧生产活动及相关污染源空间。近零胁迫的生态保护区，因其定义内部原则上不会产生有主动的人类活动，故整体管控强度都偏低。但需要说明的是，以生产源和生活源等人为源为主的区域，中高强度管控更多是为了解决严重的环境胁迫问题；而以生态源为主的区域，管控更多是偏向于对生态保护重要性的响应，故在部分生态区仍保留有少量的V级或III级管控区。

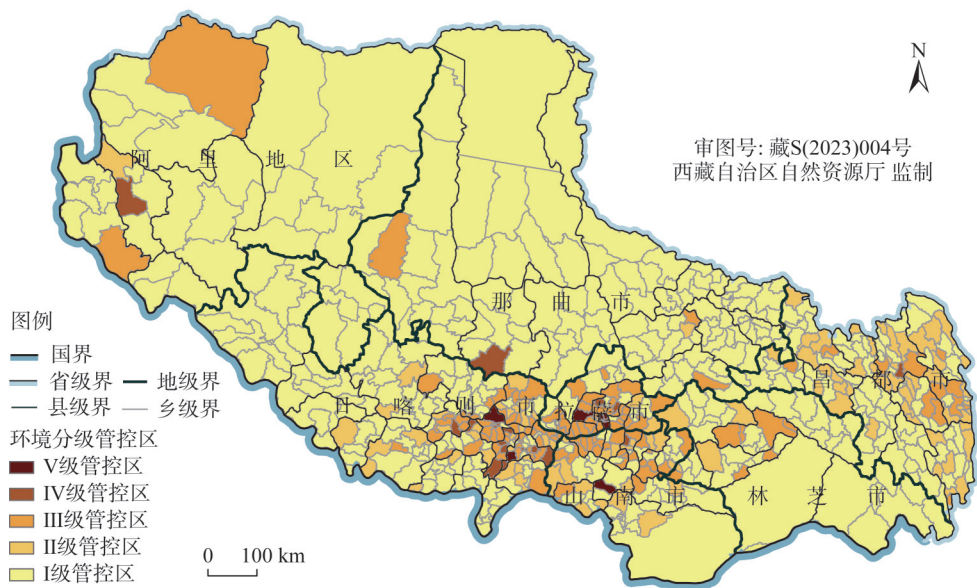


图7 西藏自治区镇域尺度的分级管控区空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of hierarchical control zones at township level in Tibet Autonomous Region

表5 西藏自治区环境功能类型区内部的分级管控区分布

	V级管控区	IV级管控区	III级管控区	II级管控区	I级管控区
生活—工业源胁迫主导的城市开发区	11	12	54	10	20
生活—农业源胁迫主导的农牧发展区	0	7	55	51	201
生态—农业源胁迫主导的生态保育区	1	0	14	32	104
近零胁迫的生态保护区	0	0	3	8	93

2.3.3 场地尺度:污染胁迫程度区

经计算得到的13类污染源空间的污染胁迫综合指数,按分类标准>0.5、0.2~0.5、0~0.2和0,依次可分为胁迫程度高值区、中值区、低值区和零值区(图8)。将其与镇域尺度的分级管控区空间叠加,可以发现V级和IV级两个管控强度较高的分级管控区涵盖有大部分的胁迫程度高值区和中值区,通过环境功能、管控等级和胁迫程度可精准定位管控对象。

受自然条件限制,全区大面积的土地均属于零值区,即无人为污染胁迫。高值区包括城镇居住区、乡村居住区共2类污染源空间,空间面积为933.03 km²,占比在0.08%,空间分布具有点状集聚性,且与城乡人口分布高度相关,亟需通过环境治理设施改进和工艺优化来重点管控原住民日常生活产生的生活垃圾与生活污水;中值区包括粮食及农产品生产区、林果茶种植区、工矿生产空间和畜禽养殖区,空间面积为5423.29 km²,占比为0.45%,空间上以连片式面状分布为主,且有少量点状分布,亟需通过技术升级和模式更新来实现污染源空间的联合减排以及就地源头减排;低值区包括特殊生产空间、人文游憩空间和水产养殖区,空间面积为222.58 km²,占比为0.02%,空间上呈点线状零散分布,且流动性相对较强,亟需通过政策引导和工程治理相配套的模

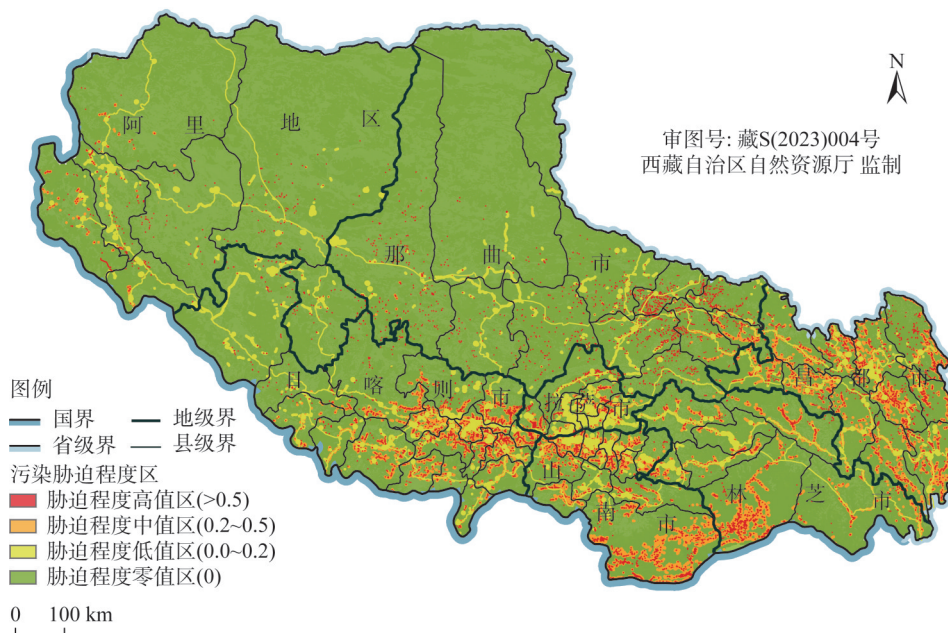


图8 西藏自治区场地尺度的污染胁迫程度区空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of pollution stress zones at site scale in Tibet Autonomous Region

式推动污染物消纳；零值区包括生态保留区、水域生态资源区、草地生态资源区以及林地生态资源区，空间面积为 1203290.97 km²，占比高达 99.45%，其中还包括部分生态保护红线范围，亟需根据生态重要性和生态敏感性来进一步确定管控对策。

3 结论与讨论

3.1 结论

以西藏自治区为例，结合土地利用和环境属性重构污染源空间，运用改进后的排放因子法分别测算各个空间单元的固体废弃物、水污染和大气污染胁迫程度，分要素解析胁迫过程及空间形态，并以集成后的综合胁迫程度为聚类指标，综合其他因素，分别在县域、镇域和场地尺度形成垂直化的环境空间管控体系和分区方案。主要结论如下：

(1) 西藏自治区全区环境污染胁迫程度整体偏低，胁迫类型以固体废弃物胁迫为主，水和大气污染胁迫相对可控，但呈现出局部块状剧增的趋势，主要集中在拉萨市、日喀则市等人口和产业规模大的重点城市以及“一江两河”流经的腹心地区和粮食重要产区。

(2) 污染胁迫以生活源空间为主，生产源空间为辅。城乡居住空间在中心城区、县城及中心镇呈典型的高强度块状胁迫，因原住民和外来游客产生大量生活垃圾和生活污水；交通运输场所沿公路及其他交通网络体系形成流动性强的线状胁迫，氮氧化物是主要胁迫指标；工矿生产场所依托小型工业园区、厂房、矿山等造成较高的点状胁迫，因工矿生产活动产生复杂污染物；农牧生产空间因藏区游牧为主的生产生活方式，形成点面结合的污染胁迫特征，且主要集中在水污染方面。

(3) 在县域尺度，可聚类得到生活—工业源胁迫主导的城市开发区、生活—农业源

胁迫主导的农牧发展区、生态—农业源胁迫主导的生态保育区以及近零胁迫的生态保护区共四种环境功能类型区,根据胁迫程度和污染源结构可匹配不同需求的上位管控政策;在镇域尺度,按管控指数 >0.1 、 $0.05\sim 0.1$ 、 $0.01\sim 0.05$ 、 $0.005\sim 0.01$ 和 $0\sim 0.005$,由高到低分为V级、IV级、III级、II级和I级管控区,全区23.08%的乡镇需要中高强度管控,分布在各个驻地镇及邻近乡镇,以生活—工业源胁迫为主,可针对主要胁迫类型确定相应治理路径;在场地尺度,污染源空间根据综合胁迫指数 >0.5 、 $0.2\sim 0.5$ 、 $0\sim 0.2$ 和 0 ,依次分为胁迫程度高值区、中值区、低值区和零值区,在生态本底限制下,全区中高值区空间占比仅0.53%,污染胁迫空间集聚度极高,对精准管控需求更大。

3.2 讨论与展望

土地是人类生产生活活动的主要空间载体,作为实体纽带将自然系统与人文系统相连接。污染源空间可以看作是不同环境功能属性的土地单元的重分类与空间再合并的过程,而污染胁迫过程则可视作这些空间通过人类生产生活活动,产生并向生态环境系统释放人为污染物的过程。根据上文的污染源分类标准,研究合并提取了74个县域单元生产空间、生活空间和生态空间的实际面积,并结合各个县的平均污染胁迫综合指数,进一步分析污染源空间构成与污染胁迫程度的相关性,通过关系图谱来探讨两者的交互作用。由图9可知,西藏自治区作为典型的青藏高原安全屏障区,其生态空间占比十分突出,生态源所造成的环境污染胁迫一般是被动的,即不会主动产生污染物排放,但也存在间接胁迫的可能。在污染胁迫程度较高的地区,例如拉萨市、日喀则市、山南市等,污染源空间的构成及组合形式往往更加复杂,承载有更多类型和更高强度的污染行为,且生产空间的胁迫贡献度相对较高;在污染胁迫程度较低的地区,例如昌都市、林芝市、那曲市和阿里地区,人为污染源空间的构成往往是一类空间作为主导,且该主导类型一般与该县域的主体功能相关。

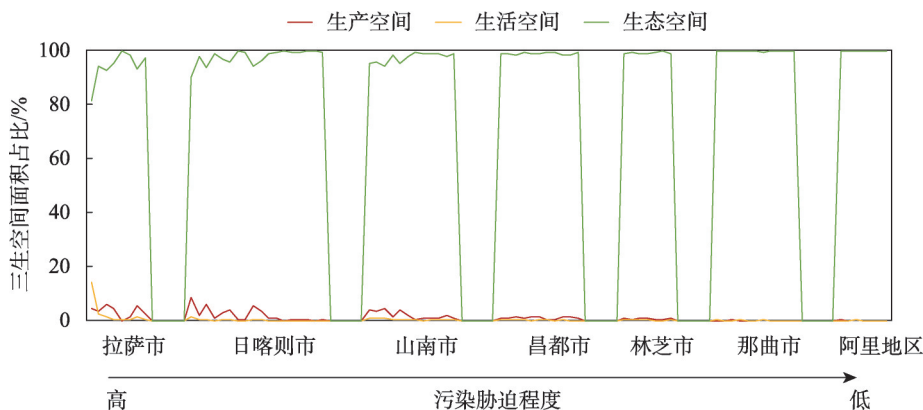


图9 污染源空间与污染胁迫的交互关系

Fig. 9 The interaction between pollution source space and pollution stress

以上特征再次证明,污染源空间是产生人为污染物的主要来源,且随着空间构成比例调整,产生的污染物类型及数量也会随之发生变化,从而产生不同的环境胁迫效应。西藏自治区的环境污染胁迫可以总结为两个特征:一是在极有限的人为污染源空间上承载着正呈上升趋势的多种污染物排放;二是污染源空间构成在不同县域甚至乡镇呈现出空间异质性,其所造成的不同环境胁迫特征更需差异化的管控对策。因此,本

文面向近零扰动的现实需求,针对西藏自治区这类青藏高原生态安全屏障区,在人类活动强度和生态本底条件的共同约束下,建立全覆盖、多尺度、垂直化的环境空间管控体系(图10)。

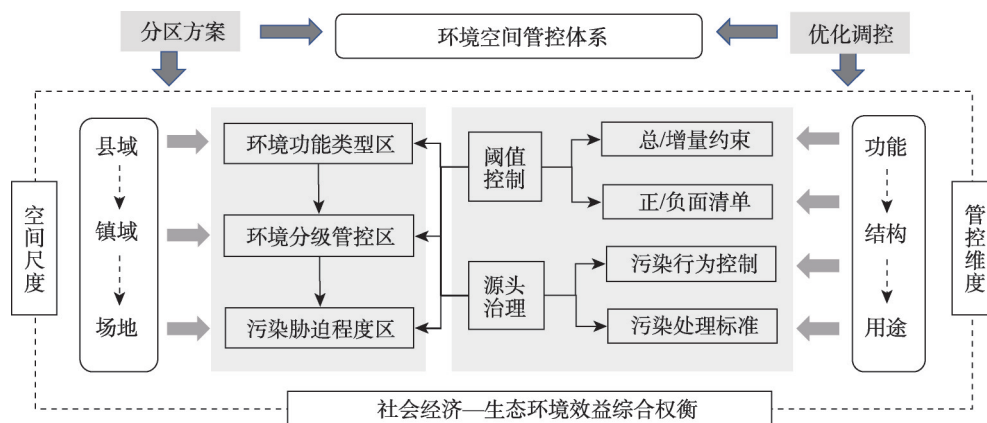


图10 环境空间管控体系的逻辑框架

Fig. 10 Framework of environmental space control system

首先,在县域尺度以维持环境系统为人类生产和生活所提供的环境服务为基础,瞄准不同的环境管控目标,立足于生态环境系统结构、状态和功能差异来构建环境功能类型区,制定正/负面排放清单等上位环境管控政策;其次,在镇域尺度将环境功能、污染胁迫强度和环境质量约束嵌套至行政区,形成管控强度不一致的分级管控区,并匹配与污染源结构及生产生活方式相适应的多样化治理模式;最后,在场地尺度侧重于污染源空间的污染胁迫属性(如源数量、分布形态、排污类型、排污强度等),针对具体的污染对象(如原住民、农牧民、游客等)、污染行为及污染处理设施等,优化管控细节和管控路径。最终,通过自上而下的总量控制和自下而上的精准分解,实现功能管控、结构管控和用途管控。

未来,可改进数据融合方法,提高栅格数据与行政区数据的匹配精度,将流动性和扩散性量化纳入到评价中,并选择不同典型区进行区别研究,提高技术方法的科学性;可将研究尺度上升至青藏高原全域,在城市、流域等实现跨区、跨界管理,并将污染末端处理设施布局优化、配套运维体系完善、原住民环境自觉培养等软硬件支撑系统嵌入至青藏高原垂直化环境空间管控体系。

参考文献(References):

- [1] 付伟,赵俊权,杜国祯. 青藏高原高寒草地生态补偿机制研究. 生态经济, 2012, 28(10): 153-157, 168. [FU W, ZHAO J Q, DU G Z. Qinghai-Tibet Plateau alpine grassland ecological compensation mechanism research. Ecological Environment, 2012, 28(10): 153-157, 168.]
- [2] 徐增让,张懿锂,成升魁,等. 青藏高原区域可持续发展战略思考. 科技导报, 2017, 35(6): 108-114. [XU Z R, ZHANG Y L, CHENG S K, et al. Scientific basis and the strategy of sustainable development in Tibetan Plateau. Science & Technology Review, 2017, 35(6): 108-114.]
- [3] 苗毅,刘海猛,宋金平,等. 青藏高原交通设施建设及影响评价研究进展. 地球科学进展, 2020, 35(3): 308-318. [MIAO Y, LIU H M, SONG J P, et al. Research progress of transportation facilities construction and their impact assessment in the Qinghai Tibet Plateau. Advances in Earth Science, 2020, 35(3): 308-318.]

- [4] 周侃, 张健, 虞虎, 等. 国家公园及周边地区人为扰动强度的时空变化与驱动因素: 以三江源国家公园为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5574-5585. [ZHOU K, ZHANG J, YU H, et al. Spatio-temporal variation and drivers of degree of human disturbance in national park and surrounding areas: A case study of Sanjiangyuan National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5574-5585.]
- [5] 周侃, 李会, 申玉铭. 京津冀地区县域环境胁迫时空格局及驱动因素. 地理学报, 2020, 75(9): 1934-1947. [ZHOU K, LI H, SHEN Y M. Spatiotemporal patterns and driving factors of environmental stress in Beijing-Tianjin-Hebei region: A county-level analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1934-1947.]
- [6] 孙克, 徐中民, 宋晓谕, 等. 人文因素对省域环境污染影响的空间异质性估计. 生态学报, 2017, 37(8): 2588-2599. [XU K, XU Z M, SONG X Y, et al. Spatial heterogeneity estimation of the impacts of human factors on environmental pollution in Chinese provinces. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2588-2599.]
- [7] 白璐, 孙园园, 赵学涛, 等. 黄河流域水污染排放特征及污染集聚格局分析. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2683-2694. [BAI L, SUN Y Y, ZHAO X T, et al. Discharge characteristics and pollution aggregation pattern of water pollution in Yellow River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(12): 2683-2694.]
- [8] DU Y, SUN T, PENG J, et al. Direct and spillover effects of urbanization on PM_{2.5} concentrations in China's top three urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 72-83.
- [9] DUC T A, VACHAUD G, BONNET M P, et al. Experimental investigation and modelling approach of the impact of urban wastewater on a tropical river: A case study of the Nhue River, Hanoi, Viet Nam. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3): 347-358.
- [10] 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 等. 青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征. 环境科学, 2021, 42(7): 3549-3554. [LIU L Y, YIN H L, JIAN L J, et al. Pollution characteristics of organophosphate esters in frozen soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3549-3554.]
- [11] 刘庆芳, 王小坤, 朱青, 等. 基于“三生”功能的西藏自治区水资源承载力系统耦合关系. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1618-1631. [LIU Q F, WANG X K, ZHU Q, et al. Coupling relationship of water resources carrying capacity system in Tibet Autonomous Region based on "production-living-ecological" function. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(6): 1618-1631.]
- [12] WANG Q Y, HUANG R J, CAO J J, et al. Black carbon aerosol in winter Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China: The effects from South Asia pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(10): 14141-14169.
- [13] 金孙梅, 侯光良, 许长军, 等. 青藏高原人类活动的极端环境风险评价. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 2048-2059. [JIN S M, HOU G L, XU C J, et al. Extreme environmental risk assessment of human activities on the Qinghai-Tibet Plateau. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 2048-2059.]
- [14] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望: 以青藏高原为例. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1582-1593. [DUAN Q T, LUO L H. Summary and prospect of spatialization method of human activity intensity: Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1582-1593.]
- [15] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. 地理学报, 2015, 70(7): 1068-1079. [XU Y, SUN X Y, TANG Q. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1068-1079.]
- [16] 周侃, 刘汉初, 樊杰, 等. 青藏高原国家公园群区域人类活动环境胁迫强度与空间效应: 以三江源地区为例. 生态学报, 2021, 41(1): 268-279. [ZHOU K, LIU H C, FAN J, et al. Environmental stress intensity of human activities and its spatial effects in the Qinghai-Tibet Plateau national park cluster: A case study in Sanjiangyuan Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 268-279.]
- [17] 许杰, 刘海江, 聂平静, 等. 国家重点生态功能区县域环境空气质量时空变化分析. 生态学报, 2022, 42(11): 4362-4368. [XU J, LIU H H, NIE P J, et al. Spatiotemporal analysis of environmental air quality in counties of national key ecological function areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4362-4368.]
- [18] 周侃, 陈好凡, 徐勇, 等. 重点生态功能区环境污染源排放特征与空间管控模式: 以藏东南为例. 环境科学学报, 2021, 41(10): 3871-3881. [ZHOU K, CHEN Y F, XU Y, et al. Emission characteristics and spatial control modes of environmental pollution sources in key ecological function zones: A case study of Southeast Tibet, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 3871-3881.]
- [19] 靳琪, 岳波, 王琪, 等. 我国不同区域农村生活垃圾的产生、管理现状: 基于抽样的村镇调查研究. 环境工程, 2018, 36(10): 97-101, 107. [JIN Q, YUE B, WANG Q, et al. Present situation of production and management of rural domes-

- tic refuse in different region of China: Based on survey of the sampled villages and towns. *Environmental Engineering*, 2018, 36(10): 97-101, 107.]
- [20] ATIQU U Z, STEFFEN L. Urban growth and waste management optimization towards 'zero waste city'. *City, Culture and Society*, 2011, 2(4): 177-187.
- [21] 郭华, 李佳美, 邱明杰, 等. 我国生活垃圾产量的多元线性回归预测分析. *环境与发展*, 2018, 30(1): 61-63. [GUO H, LI J M, QIU M J, et al. Multivariate linear regression prediction of domestic waste yield in China. *Environment and Development*, 2018, 30(1): 61-63.]
- [22] KARAMOUZ M, ZAHRAIE B, KERACHIAN R, et al. Development of a master plan for industrial solid waste management. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2006, 3(3): 229-242.
- [23] 李森泉, 田恬, 陈奔, 等. 流域非点源水污染排放清单估算系统构建. *中国环境管理*, 2019, 11(2): 94-100. [LI M Q, TIA T, CHEN B, et al. Construction of watershed non-point source water pollution emission inventory estimation system. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, 11(2): 94-100.]
- [24] LEE D, LEE Y, JANG K. Korean national emissions inventory system and 2007 air pollutant emission. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2011, 5(4): 278-291.
- [25] 刘庄, 晁建颖, 张丽, 等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题. *水科学进展*, 2015, 26(3): 432-442. [LIU Z, CHAO J Y, ZHANG L, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 432-442.]
- [26] TRIPATHI M P, PANDA R K, RAGHUWANSHI N S. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(3): 365-379.
- [27] 李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展. *生态学报*, 2016, 36(9): 2482-2489. [LI Y F, LIU H Y, GAO P F, et al. Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2482-2489.]
- [28] HAYASHI S, MURAKAMI S, XU K Q, et al. Simulation of the reduction of runoff and sediment load resulting from the Gain for Green Program in the Jialingjiang catchment, upper region of the Yangtze River, China. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 126-137.
- [29] 王蕾, 刘思遥, 王滨松. AERMOD 和 CALPUFF 大气污染扩散模型的对比研究. *环境科学与管理*, 2017, 42(5): 42-45. [WANG L, LIU S Y, WANG B S. Comparative study of AERMOD and CALPUFF atmosphere pollution control models. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(5): 42-45.]
- [30] 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. [WANG J R, HU L T. Advances in mathematical methods of groundwater pollution source identification. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 943-952.]
- [31] 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): 512.1-512.16.
- [32] 李颖明, 黄宝荣. 我国的分区实践与环境管理分区研究. *生态经济*, 2010, 26(2): 169-172. [LI Y M, HUANG B R. Regionalization practice in China and research on environmental management regionalization. *Ecological Economy*, 2010, 26(2): 169-172.]
- [33] 李莉, 李燃, 赵翌晨, 等. 天津市典型区域水生态环境功能区划生态功能评价方法研究. *环境科学与管理*, 2020, 45(5): 123-127. [LI L, LI R, ZHAO Y C, et al. Ecological evaluation method of water eco-environmental regionalization in typical regions of Tianjin. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(5): 123-127.]
- [34] ISAAC B. The conceptual development and use of ecoregion classifications. Corvallis, Oregon: Oregon State University, 1999.
- [35] 施红英. 太湖流域水生态环境功能区划及其关键问题. *环境与发展*, 2019, 31(1): 191-192. [SHI H Y. Water environmental function zoning and its key issues in Taihu Lake Basin. *Environment and Development*, 2019, 31(1): 191-192.]
- [36] 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 等. 大气环境分区管理: 以广东省为例. *环境科学*, 2018, 39(1): 49-56. [YANG L L, LI M H, LIAO C H, et al. Air quality subarea management: A case study of Guangdong province. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 49-56.]
- [37] WOODFIELD N K, LONGHURST J W S, BEATTIE C I, et al. Regional collaborative urban air quality management: Case studies across great Britain. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(4): 595-599.
- [38] RAPAPORT E. Stockholm environmental zone, a method to curb air pollution from bus and truck traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2002, 7(3): 213-224.

- [39] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201. [FAN J. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [40] 樊杰. 地域功能—结构的组织途径: 对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. 地理研究, 2019, 38(10): 6-20. [FAN J. Spatial organization pathway for territorial function-structure: Discussion on implementation of major function zoning strategy in territorial spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 6-20.]
- [41] 杨永春, 张薇, 曹宛鹏, 等. 国家安全视角下的我国西部国土空间规划: 体系完善与基本导向. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2264-2280. [YANG Y C, ZHANG W, CAO W P, et al. Territory spatial planning of Western China from the perspective of national security: Perfect system and basic orientation. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2264-2280.]
- [42] 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. [WANG J N, XU K P, CHI Y Y, et al. The environmental function assessment and zoning scheme in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 129-135.]
- [43] 秦昌波, 张培培, 于雷, 等. “三线一单”生态环境分区管控体系: 历程与展望. 中国环境管理, 2021, 13(5): 151-158. [QIN C B, ZHANG P P, YU L, et al. The construction of "three lines one permit" eco-environmental zoning control system: Progress and prospect. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(5): 151-158.]
- [44] FREUDENBERGER L, HOBSON P R, SCHLUCK M, et al. Nature conservation: Priority-setting needs a global change. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22(5): 1255-1281.
- [45] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6. [FU B J, LIU G H, CHEN L D, et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6.]
- [46] 田娟. 广州市声环境功能区划及其实施管理的对策建议研究. 环境科学与管理, 2017, 42(2): 70-73. [TIAN J. Recommendations on acoustic environmental function division and implement management policy in Guangzhou. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(2): 70-73.]
- [47] 吴波, 郭书海, 李宝林, 等. 中国土壤环境功能区划方案. 应用生态学报, 2018, 29(3): 961-968. [WU B, GUO S H, LI B L, et al. Draft of soil environmental function regionalization of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 961-968.]
- [48] 徐勇, 赵桑, 段健. 国土空间规划的土地利用分类方案研究. 地理研究, 2019, 38(10): 2388-2401. [XU Y, ZHAO S, DUAN J. Studies on the land use classification scheme for territory spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2388-2401.]
- [49] 潘春梅, 朱翔, 王健, 等. 大气污染源排放清单研究进展. 环境科学导刊, 2020, 39(4): 72-78. [PAN C M, ZHU X, WANG J, et al. Research progress on emission inventory of air pollution sources. *Environmental Science Survey*, 2020, 39(4): 72-78.]
- [50] 陈好凡, 徐勇. 区域环境功能管控区划方法及应用. 地理学报, 2021, 76(3): 663-679. [CHEN Y F, XU Y. Technical method and application of the regional environmental function management and control zoning. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 663-679.]
- [51] 孔晴. 中国环境污染综合指数的构建及其收敛性研究. 统计与决策, 2019, 35(21): 122-125. [KONG Q. Study on the construction and convergence of China's comprehensive environmental pollution index. *Statistics & Decision*, 2019, 35(21): 122-125.]

Analysis of environmental pollution stress and construction of vertical spatial control system in the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Tibet Autonomous Region

CHEN Yu-fan^{1,2,3}, ZHOU Kan^{4,5}, XU Yong^{4,5}

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Collaborative Innovation Center & Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Accurately identifying pollution sources and their spatial stress processes, and establishing a targeted control system based on the characteristics of stress regularity are the scientific breakthrough points to ensure the ecological and environmental security of the Qinghai-Tibet Plateau. Taking Tibet Autonomous Region as an example, we rebuilt the pollution source space by combining land use and pollution behavior, used the improved emission factor method to accurately measure the pollution stress degree and its spatial effect by sources and elements, and constructed a vertical environmental spatial control system and multi-dimensional zoning scheme. The results show that the extremely limited anthropogenic pollution source space in Tibet carries a sudden increase in the discharge of various pollutants, and the complexity of the spatial structure of pollution sources is positively correlated with the pollution stress. The high stress, mainly solid waste discharge, is concentrated in the living source space of key cities and the hinterland of the Yarlung Zangbo River, Nianchu River and Lhasa River, and presents massive, linear and point-like spatial stress forms in urban and rural living space, transportation space and industrial and mining production space. With net-zero disturbance as the target, four environmental functional zones, five hierarchical control zones and four pollution stress zones can be formed by spatial clustering in three scales of county, town and site, respectively. This enables functional control, structural control and usage control to be achieved from top to bottom. It is suggested that the vertical control system oriented to the pollution source space should be integrated into the national land space utilization system, and the list of positive and negative aspects of the environment, balanced environmental infrastructure and pollution control standards should be adapted at three scales to improve the precision control efficiency of the ecological environment in the ecological barrier area of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: environmental pollution source; environmental stress; environmental space management and control; vertical system; Qinghai-Tibet Plateau