

马梓翔,晁伟鹏,朱叶.新疆干旱区农业面源污染空间分异及治理对策[J].中国沙漠,2026,46(3):240-254.

新疆干旱区农业面源污染空间分异及治理对策

马梓翔,晁伟鹏,朱叶

(塔里木大学 经济与管理学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 系统解析新疆农业面源污染空间分异规律与驱动机制,可为治理新疆农业面源污染和提升生态环境质量提供参考。采用排污系数法与等标污染负荷强度来核算新疆26个地区种植业、畜禽养殖、水产养殖及生活污水的总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮和化学需氧量(COD)排放量及强度,运用ArcGIS空间聚类分析法划分污染负荷强度分区及污染控制分区,结合植被覆盖度与降水因子,通过熵权法量化污染敏感性,最后借助地理探测器工具,对上述分区的驱动机制进行验证与深化。结果表明:(1)TN、TP、COD排放峰值集中于伊犁,氨氮峰值出现在喀什,克拉玛依为各类污染物最低值区;畜禽养殖是全域污染负荷最主要的来源,其后依次为种植业、生活污水和水产养殖。(2)聚类分析显示,乌鲁木齐、白杨、克州为中度负荷区,兵团其他师市为高度负荷区,自治区其他地区为低度负荷区;乌鲁木齐为生活污水和水产养殖复合高敏感区,克州为畜禽养殖主导高敏感区,兵团区域种植业敏感度全域最高。(3)在单因子驱动力分析中,产业模式对新疆农业面源污染的驱动最强,环境敏感性最弱,但产业模式-行政区划-环境敏感性中各因子耦合对新疆面源污染空间分异存在协同增强效应。

关键词: 新疆;农业面源污染;排污系数法;等标污染负荷强度

文章编号: 1000-694X(2026)03-240-15

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00264

中图分类号: X52;X71

文献标志码: A

0 引言

农业面源污染指农业生产活动中产生的氮磷、农药残留及有机污染物,通过地表径流、地下渗漏等扩散性路径进入水土环境系统,引发复合型生态退化的非点源污染现象^[1-4]。该类污染具有来源复合性的典型特征,主要涵盖农村生活源(如生活污水、垃圾与厕所排放)、种植业源(包括化肥、农药、农膜使用及秸秆废弃)、畜禽养殖源与水产养殖源等多类排放^[5-7]。在当前点源污染逐步得到管控的背景下,农业面源污染已成为影响全球生态环境的关键因素,其污染贡献尤为显著。根据《第二次全国污染源普查公报》(2020年)^[8],农业源排放的TN、TP、氨氮和COD分别达到21.20万吨、141.49万吨、21.62万吨和1067.13万吨,在污染物全国总排放中占比分别为14.66%、46.52%、22.44%和49.77%,显著超过生活与工业源的贡献,表明中国在农业面源污染治理方面仍面临严峻挑战。

农业面源污染的核算方法主要有清单分析法^[9-12]、排污系数法^[13-15]、等标污染负荷法^[16-18]等,模拟模型有SWAT模型^[19]、InVEST模型^[20-21]、DPeRS^[22]模型等。赖斯芸等^[9]基于空间均质化假设构建污染核算单元,通过分区抽样-参数统合实现非点源污染的精准测定;陈敏鹏等^[11]运用清单分析法,结合GIS空间分析技术,系统测算中国农业农村面源污染的强度阈值与空间梯度特征,首次构建了污染类型与地理分区的耦合关系图谱;谢培等^[10]、丘丽清等^[17]、赖诗琪^[18],通过清单分析法与等标污染负荷法的耦合应用,在北京、海南和长江经济带等典型地区,完成污染排放量核算、负荷等级划分及分区特征解析。以上研究通过对等标污染强度的持续改良,推动核算方法在多尺度区域的应用拓展。

新疆作为丝绸之路经济带核心区与国家级粮棉生产基地,其农业面源污染治理兼具生态安全和战略安全双重意义。当前,学界关于新疆农业面源污染的研究多集中于污染负荷测算^[23]、单一污染源的

收稿日期:2025-07-06; 改回日期:2025-10-22

资助项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(24YJAZH029);塔里木大学科研创新计划项目(TDGRI2024106)

作者简介:马梓翔(2001—),男,河南汝州人,硕士研究生,研究方向为人口资源与环境。E-mail: 3199261734@qq.com

通信作者:晁伟鹏(E-mail: ChaoWeiPeng0103@163.com)

时空分布与演变规律^[24]以及局部区域主要污染物的空间分异特征等方面^[25]。然而,从全疆尺度系统分析种植业、畜禽养殖、水产养殖及生活污水污染源综合贡献机制的研究尚显不足,尤其缺乏基于污染负荷核算方法的新疆农业面源污染空间分布格局研究。本研究以新疆维吾尔自治区及新疆生产建设兵团为研究区域,采用排污系数法系统核算区域农业面源污染负荷。为消除区域规模差异影响,引入等标污染负荷强度指标,基于统一尺度量化农业面源污染物排放强度,从而准确辨识关键污染源类型。在此基础上,划分污染负荷强度等级区划及污染控制优先级分区,并结合植被覆盖度和降水两个自然因子,辨析不同区域对不同污染源作用的敏感性差异,通过地理探测器验证和深化产业模式-行政区划-环境敏感性中各因子耦合驱动机制。基于上述多维分析结果,提出相对应的农业面源污染分区治理对策。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

新疆位于中国西北,地处亚欧大陆腹地,总面积约166万km²,占中国陆地面积的1/6,是中国面积最大的省级行政区。新疆地理环境复杂多样,以“三山夹两盆”的地形格局为核心,兼具荒漠、绿洲、雪山、草原等独特景观,是典型的干旱区与山地生态系统结合体,年均降水量不足150mm(南疆部分地区仅20mm),年蒸发量高达3000mm。

1.2 数据来源及参数选择

基础数据(包括全疆各地区农村人口数量、面积、行政区划面积等)主要来源于2021年《中国农村统计年鉴》《新疆统计年鉴》及《新疆生产建设兵团统计年鉴》;农业面源污染产排污系数主要源自国家及地方发布的权威污染源普查成果,具体包括《第二次全国污染源普查公报》《农业污染源产排污系数手册》《新疆维吾尔自治区第二次全国污染源普查公报》及《新疆生产建设兵团第二次全国污染源普查公报》;遥感数据主要来源于地理空间数据云、资源环境科学数据平台、国家地理信息公共服务平台和国家青藏高原科学数据中心。

1.3 研究方法

本研究运用排污系数法、等标污染负荷强度法

与空间聚类分析,系统评估2021年新疆各地区农业面源污染状况及驱动机制,并借助地理探测器对驱动因素加以验证和深入解析。基于新疆的地域特点,本研究将农业面源污染源归为种植业、畜禽养殖、水产养殖及生活污水四类,并对TN、TP、氨氮和COD等关键污染物进行重点核算。由于第十一师与第十二师的农业面源污染排放总量较低,本研究未将其作为独立核算单元纳入分析。

1.3.1 排污系数法

在数据处理阶段,对存在的缺失值通过插值法予以填补,保障数据集的完整性。在此基础上,以市(县)及兵团师市为独立核算单元,采用排污系数法构建农业面源污染产排污清单^[26],估算各单元农业面源污染物的年排放量。

$$Q_{v_{\text{种植}}} = (A_i \times e_{iv} + A_m \times e_{mv}) \times \frac{z_j}{z_o} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$Q_{z_{\text{畜禽}}} = (B_z \times L_{zv} + R_z \times E_{zv}) \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$Q_{v_{\text{水产}}} = q_v \times e_v \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$Q_{v_{\text{生活}}} = T_c \times T_p \times 365 \times (1 - A \times C) \quad (4)$$

$$Q_{\text{总}} = Q_{v_{\text{种植}}} + Q_{z_{\text{畜禽}}} + Q_{v_{\text{水产}}} + Q_{v_{\text{生活}}} \quad (5)$$

式中: $Q_{v_{\text{种植}}}$ 为新疆种植业第 v 项污染物排放量(t); A_i 为新疆农作物总播种面积(10^3 hm^2); A_m 为新疆园地面积(km²); e_{iv} 为新疆农作物种植过程中第 v 类污染物流失系数($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); e_{mv} 为新疆园地第 v 类污染物流失系数($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); z_j 为新疆2021年化肥使用量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); z_o 为新疆2017年化肥使用量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $Q_{z_{\text{畜禽}}}$ 为新疆第 z 类畜禽养殖第 v 项污染物排放量(t)(z 指生猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡5类畜禽); B_z 为新疆第 z 类畜禽规模化养殖场出栏量(头); R_z 为新疆第 z 类畜禽养殖户出栏量(头); L_{zv} 为新疆第 z 类畜禽规模化养殖第 v 项污染物产污系数($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$); E_{zv} 为新疆第 z 类畜禽养殖户第 v 类污染物产污系数($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$); $Q_{v_{\text{水产}}}$ 为新疆水产养殖第 v 项污染物排放量(t); q_v 为新疆水产养殖的水产品产量(t); e_v 为新疆水产养殖第 v 项污染物排放系数($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); $Q_{v_{\text{生活}}}$ 为新疆生活污水污染物排放量(t), T_c 为常住人口(万人); T_p 为新疆人均产污强度; A 为已进行生活污水处理的行政村比例; C 为污染物综合去除率; $Q_{\text{总}}$ 为污染物排放总量(t)。

1.3.2 等标污染负荷强度

鉴于农业面源污染物排放具有空间异质性特

征,即使区域排放总量相同,若其承载的面积不同,则单位面积的环境压力与潜在污染风险亦存在显著差异。因此,相较单一的排放总量指标,采用单位面积的污染物排放强度更能科学表征区域农业面源污染程度。为进一步实现不同区域污染负荷对环境影响的跨尺度可比性,在既有研究基础上引入等标污染负荷强度指标^[16-18],该指标表示:稀释单位面积上产生的污染物,使其浓度达到环境质量标准限值所需的水体体积。该指标通过将实际排放强度转化为标准稀释水量,有效消除了区域规模差异,从而为在同一尺度下评估与比较不同地区农业面源污染的环境影响提供了科学依据。

$$P_i = \frac{Q_i}{C_{0i}} \quad (6)$$

$$I_i = \frac{P_i}{A} \quad (7)$$

$$Z_n = \sum_{i=1}^n I_i \quad (8)$$

$$Z_m = \sum_{i=1}^m I_i \quad (9)$$

式中: P_i 为第*i*种等标污染负荷($\text{t}\cdot\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$); Q_i 为污染物*i*的污染物排放量(t); C_{0i} 代表污染物*i*所依据的环境质量标准限值(《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III类标准)($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); I_i 为第*i*种污染物等标污染负荷强度($\times 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$); A 为某地区污染区域面积(km^2); Z_n 为污染源的等标污染负荷强度($\times 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$); n 为污染物种类; Z_m 为区域的等标污染负荷强度($\times 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$); m 为区域污染源个数。

1.3.3 聚类分析法

本研究基于核算得到的等标污染负荷强度数据,运用ArcGIS10.2空间聚类分析工具,实现新疆农业面源污染负荷强度空间分布的可视化表达。该聚类分析的核心目标在于,依据各地区单元的等标污染负荷强度属性值,识别并划分具有相似污染强度特征的空间区域(即污染负荷强度分区)。本研究的重点是污染强度的数值相似性,而非空间邻近性,因此在分析过程中未施加空间约束条件。在此设定下,工具内部采用K-means聚类算法进行分组计算,K-means算法在无约束条件下属于NP难题,为有效求解,ArcGIS采用了一种启发式贪婪算法进行优化计算,该算法通过迭代优化,最终收敛于一个局部最优解,其优化目标旨在最小化组内各单元污染负荷强度的差异,同时最大化不同组别间的差异。通过此过程,最终将研究区各市县单元科学地划分为若

干具有内部高同质性和组间高异质性的污染负荷强度分区。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是一种专门用于量化地理现象空间分异及驱动因素的统计方法。其核心在于定量评估潜在驱动因子对地理现象空间分异的解释力^[27]。本文使用地理探测器验证农业面源污染空间分异驱动机制,定量解析行政区划(兵团和地方)、产业模式(化肥施用强度、畜禽养殖密度、水产养殖面积和人均日污水产生量)、环境敏感性(植被覆盖度和降水)、控制变量(地区生产总值、人口密度和耕地占比)对农业面源污染负荷空间分异的解释力,并检测因子间的交互作用。为满足地理探测器模型对输入变量的要求,本研究利用SPSS软件中的K均值聚类法,将连续型数值变量转换为离散型分类变量^[28-29]。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^h N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (10)$$

式中: q 值用于度量探测因子*X*对地理现象*Y*空间分异的解释程度,取值 $[0, 1]$, q 值越大,表明因子*X*对*Y*空间分布的影响越大,反之则越小。在本研究中, q 值越大,表明该驱动因子对农业面源污染负荷空间分异的贡献越显著; h 代表因子的分层或分区; N_h 和*N*代表层*h*和整个研究区域的空间单元数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为层*h*和整个研究区域的农业面源污染负荷的方差。

2 结果与分析

2.1 新疆农业面源污染物排放量

新疆农业面源污染物排放的空间分布呈现明显区域差异(图1~2)。在TN排放方面,伊犁、阿克苏、喀什、和田、阿拉尔、可克达拉、五家渠、胡杨河和石河子均超过全疆平均水平;在TP排放方面,昌吉、伊犁、阿克苏、喀什、和田、阿拉尔、铁门关、可克达拉、五家渠、胡杨河、石河子及北屯高于全疆均值;氨氮排放量超过均值的区域包括昌吉、伊犁、巴州、阿克苏、喀什、和田、五家渠和石河子;COD排放量高于平均水平的地区则集中于昌吉、伊犁、塔城、阿勒泰、阿克苏、喀什及和田。

从空间格局看,TN、TP、COD排放峰值均出现在西北部的伊犁,而氨氮排放峰值则位于西南部的喀什,各类污染物排放最小值均出现在西北部的克拉

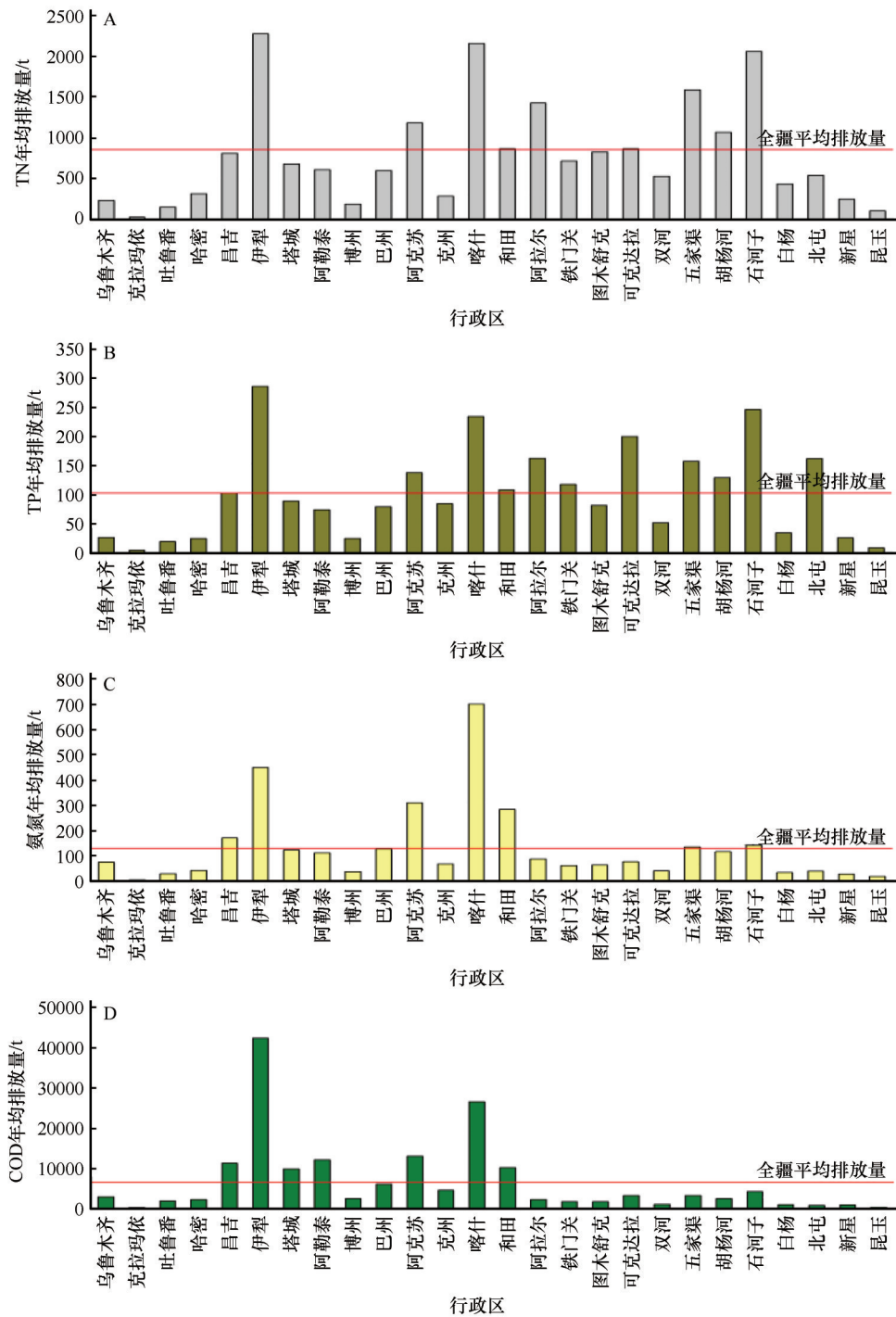


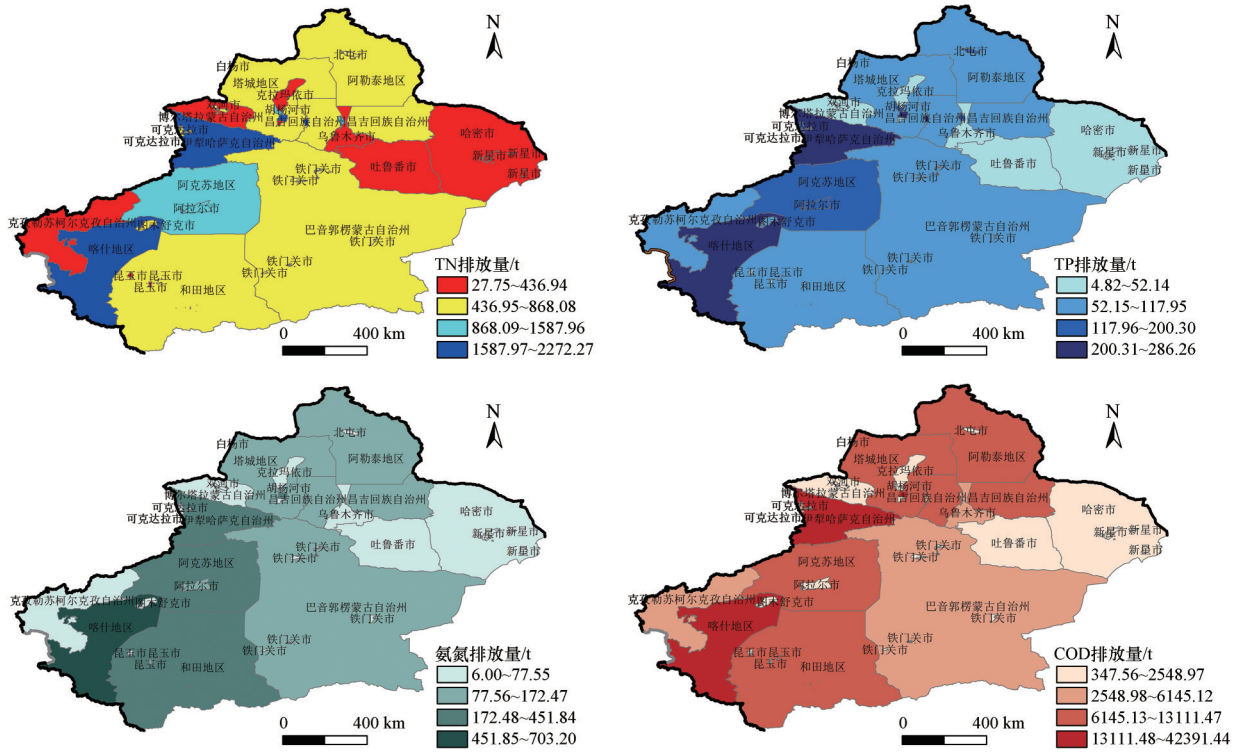
图1 新疆农业面源TN、TP、氨氮、COD排放量

Fig.1 The emissions of agricultural non-point sources of TN, TP, ammonia nitrogen and COD in Xinjiang

玛依。综合图2所示的空间分布特征,新疆农业面源污染物排放高值区主要分布于西部伊犁-喀什带,而东疆、北疆经济较发达区域及南疆西部地区的排放水平相对较低。

TN以种植业(51.70%)和畜禽养殖(33.90%)为主导,二者贡献率达85.60%(表1),凸显种植业与畜禽养殖主导的产业模式对区域氮污染的强驱动作

用;TP主要源于畜禽养殖(40.80%),其次为水产养殖(24.88%),表明畜禽和水产养殖产业的发展是区域磷污染负荷增长的主要推手;氨氮排放呈现畜禽养殖(41.10%)与生活污水(40.92%)双源并重特征;COD高度集中于畜禽养殖源(70.44%),充分反映了该产业在区域有机污染物排放中占比较高。值得注意的是,水产养殖业对TP排放的贡献率(24.88%)已



注:基于国家地理信息公共服务平台标准地图(审图号:GS(2024)0650)制作,底图边界无修改

图2 新疆农业面源污染物排放量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of emissions of agricultural non-point source pollutants in Xinjiang

表1 新疆农业面源各污染类型污染物排放量及贡献率

Table 1 The emission and contribution rate of agricultural non-point source pollutants in Xinjiang

污染类型	排放量/t				占比/%			
	TN	TP	氨氮	COD	TN	TP	氨氮	COD
种植	10 756.12	605.63	565.70	-	51.70	22.60	16.57	-
畜禽养殖	7 052.27	1 093.29	1 403.08	120 408.92	33.90	40.80	41.10	70.44
水产养殖	300.88	666.84	48.11	1 572.78	1.45	24.88	1.41	0.92
生活污水	2 693.81	314.05	1 397.21	48 947.10	12.95	11.72	40.92	28.64
合计	20 803.08	2 679.81	3 414.10	170 928.80	100	100	100	100

跃居第二位,鉴于该产业近年快速发展^[30-31],其各类污染物排放占比存在持续上升趋势,需纳入重点管控范畴。由新疆农业面源污染的空间分布格局与污染源结构特征可以看出,当前污染物排放量主要受区域内主导的农业产业结构驱动。种植业污染属于面源污染,其中COD主要来源于土壤固有有机质、秸秆腐解及肥料残留的随水流失,具有显著的间接性、分散性和季节性特征。该排放过程难以监测和量化,且其排放强度远低于工业废水和集约化畜禽养殖等点源污染。因此,在农业环境管理领域,种植业COD污染物通常不被列为关键监管指标,防治重点更集中于由氮、磷养分流失所导致的水体富营养化

问题^[32]。

2.2 新疆农业面源污染负荷

2.2.1 新疆农业面源污染排放强度

在TN排放强度上,兵团师市表现尤为突出,阿拉尔、铁门关、图木舒克等TN排放强度均高于全疆平均水平,乌鲁木齐的TN排放强度也明显高于全疆(图3),这反映出兵团管辖区域和乌鲁木齐市在TN污染管控上面临着更大的压力。在TP排放强度方面,兵团城市同样占据主导,除白杨外,铁门关、图木舒克、可克达拉等其余兵团师市TP排放强度均高于全疆平均水平,这表明兵团体系普遍面临较高的TP

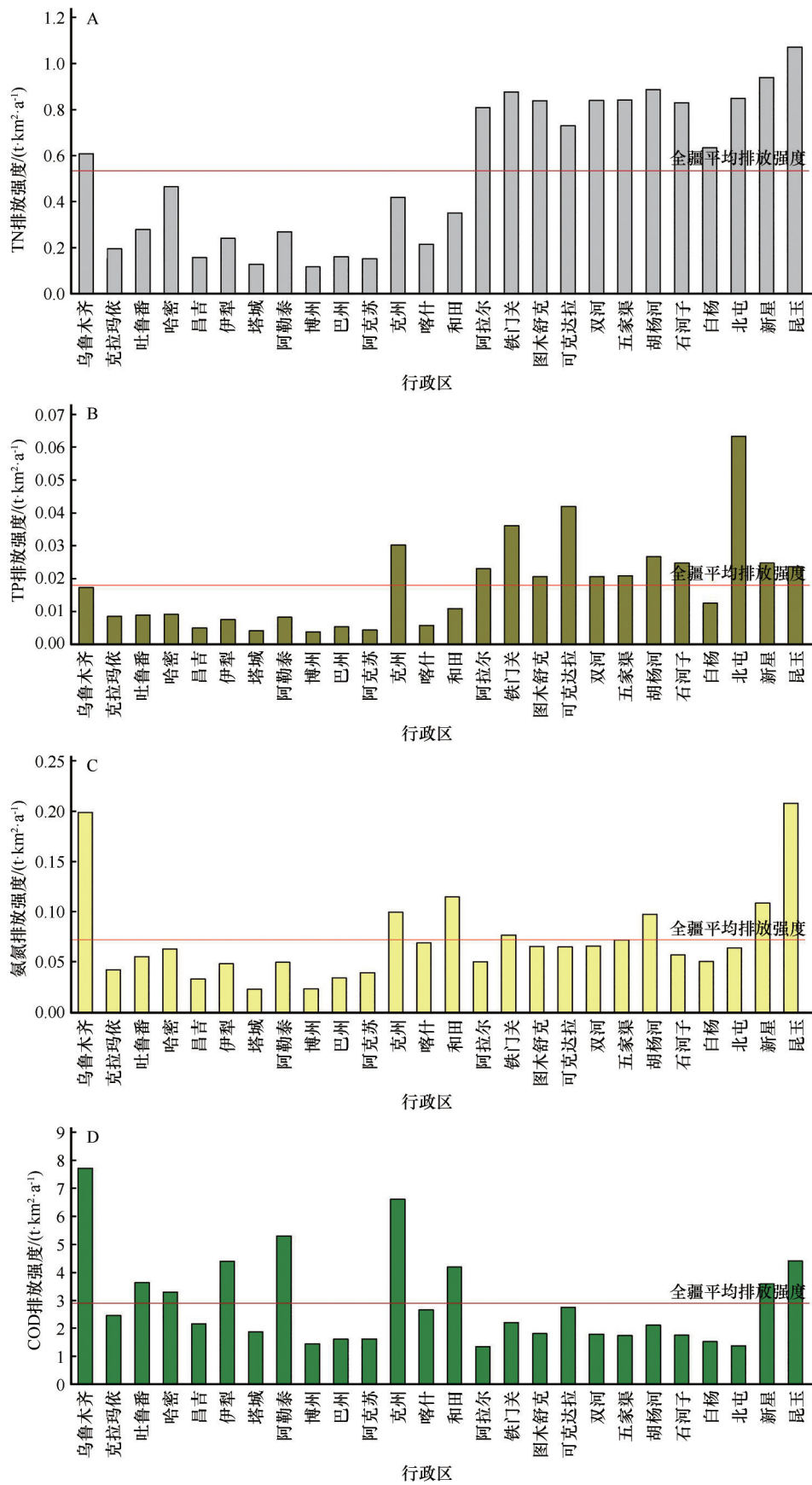


图 3 新疆农业面源 TN、TP、氨氮、COD 排放强度

Fig.3 The emission intensity of agricultural non-point sources of TN, TP, ammonia nitrogen and COD in Xinjiang

排放强度。氨氮排放强度高值区在兵团和自治区都有表现,乌鲁木齐、克州、和田、铁门关、五家渠、胡杨河、新星和昆玉的排放强度高于全疆平均水平,说明氨氮污染的高贡献度区域既存在于兵团师市,也存在于自治区,呈现出混合分布但受具体行政单元属性影响的格局。COD排放强度高值区则相对集中于自治区,乌鲁木齐、吐鲁番、哈密、伊犁、阿勒泰、克州和和田,排放强度高于全疆平均水平,昆玉、新星两个兵团城市也位列其中,但高值主体为自治区地州市,体现COD排放强度在行政区划类型上的差异。

综合来看,行政区划属性对污染物排放强度的空间分异具有驱动作用:全疆TN、TP排放强度大的区域高度集中于兵团师市,COD排放强度高值区分布于自治区。从整体排放情况看,新疆农业面源各污染物排放强度处于较高水平,污染分布广、部分地区污染突出,农业面源污染防治形势依旧严峻。鉴于排放强度在空间上与行政区划呈现强关联性,未来管控策略亟须考虑不同行政单元的管理体制、经济结构特征等,实施更具针对性的分区、分污染物、分行政属性的精准管控。

2.2.2 新疆农业面源污染负荷强度

根据新疆各地区具体情况将等标污染负荷强度占比大于30%作为该地区主要污染类型^[17],主要污染源类型呈现显著区域分异(表2)。乌鲁木齐为生活污水主导型;克拉玛依、伊犁、塔城、阿勒泰、博州、巴州为畜禽养殖主导型;吐鲁番、哈密、昌吉、阿克苏、克州、喀什为复合污染型(生活污水+畜禽养殖);阿拉尔、铁门关等11个师市为种植-畜禽复合主导型;北屯为多元复合型(种植+畜禽养殖+水产养殖)。从全疆污染源层级结构看,各污染类型的等标污染负荷强度排序为:畜禽养殖>种植业>生活污水>水产养殖。进一步分析可见,不同行政属性的区域其主导污染模式各异:自治区以畜禽养殖污染为主导,而兵团则呈现种植业与畜禽养殖并重的复合模式。这一结构性差异为实施分区管控提供依据。

2.3 新疆农业面源污染负荷强度分区

空间聚类分析表明,新疆农业面源污染负荷区未呈现显著的空间集聚性(Global Moran's $I = -0.225, p = 0.311$)。这一统计结果揭示了与常规认知相悖的规律,污染分布呈随机性特征,拒绝空间自相关假设($z = -1.01$),表明自治区与兵团师市的农业

面源污染发展不存在显著的空间相互作用,其根本诱因可能为特殊行政区划结构,兵团师市与地方州县形成双轨制发展模式,导致污染源在宏观尺度呈破碎化岛状分布,占主导的荒漠基质稀释了绿洲高值区的集聚信号是外在因素。

由聚类分析可知,全疆共有11个高度负荷区、3个中度负荷区和12个低度负荷区。从空间格局看,污染负荷呈现明显的核心-边缘分异特征:高度污染负荷区集中分布于天山南麓与北麓的农牧团场核心地带,包括阿拉尔、铁门关、图木舒克、可克达拉、双河、五家渠、胡杨河、石河子、北屯、新星和昆玉11个区域;中度污染负荷区则主要位于天山北坡部分区域及周边过渡带,包括乌鲁木齐、克州和白杨;低度污染负荷区涵盖克拉玛依、吐鲁番、哈密、昌吉、伊犁、塔城、阿勒泰、博州、巴州、阿克苏、喀什和和田12个区域(图4)。不同污染负荷区在空间上呈现集聚性分布,高度污染区多位于绿洲农业核心区及兵团师市,而低度污染区则集中于自治区。

2.4 新疆农业面源污染控制分区

综合新疆各地区农业面源污染类型识别结果(表2)与污染负荷强度空间分区结果(图4),依据不同区域污染源类型组合特征及对应的污染负荷强度等级,构建新疆农业面源污染控制分区方案,将全区划分为8种典型污染控制类型区。该分区结果的空间分布格局(图5)显著表征了区域地理环境差异与农业产业活动格局的空间异质性。具体分区特征如下:

生活污水污染型-中度负荷区:空间分布高度集中,仅见于乌鲁木齐,呈孤点状分布。这表明生活污水排放是该区域农业面源污染的首要贡献源。

畜禽养殖污染型-低度负荷区:分布于克拉玛依、伊犁、塔城和阿勒泰等农牧区。这些区域普遍呈现畜禽养殖规模较大但污染扩散效应弱的特点,致使整体污染负荷稳定维持在较低水平。

生活污水和畜禽养殖污染型-低度负荷区:覆盖范围较广,包括吐鲁番、哈密、昌吉、阿克苏和喀什。尽管生活污水与畜禽养殖污染共同构成主要压力源,但其叠加效应尚未显著提升区域整体负荷,污染水平整体较低。

生活污水和畜禽养殖污染型-中度负荷区:分布于克州。其生活污水排放强度与畜禽养殖活动规模产生显著叠加效应,驱动污染负荷跃升至中度水平。

表2 新疆各地区农业面源污染类型的等标污染负荷强度

Table 2 Equivalent pollution load intensity of agricultural non-point source pollution types in different regions of Xinjiang

行政区	等标污染负荷强度/($\times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$)					等标污染负荷强度占比/%				主要污染类型
	生活污水	种植	畜禽养殖	水产养殖	合计	生活污水	种植	畜禽养殖	水产养殖	
乌鲁木齐	0.719	0.031	0.309	0.073	1.132	63.49	2.74	27.32	6.45	生活污水
克拉玛依	0.037	0.030	0.170	0.024	0.262	14.31	11.40	65.07	9.22	畜禽养殖
吐鲁番	0.200	0.086	0.201	0.003	0.491	40.86	17.51	40.92	0.71	生活污水、畜禽养殖
哈密	0.137	0.054	0.213	0.007	0.411	33.36	13.14	51.82	1.68	生活污水、畜禽养殖
昌吉	0.079	0.031	0.131	0.017	0.258	30.65	12.13	50.76	6.46	生活污水、畜禽养殖
伊犁	0.099	0.034	0.247	0.014	0.393	25.23	8.67	62.66	3.44	畜禽养殖
塔城地区	0.027	0.030	0.127	0.003	0.187	14.31	16.04	68.03	1.62	畜禽养殖
阿勒泰地区	0.065	0.032	0.309	0.020	0.426	15.28	7.47	72.66	4.59	畜禽养殖
博州	0.041	0.030	0.104	0.005	0.180	22.89	16.85	57.73	2.53	畜禽养殖
巴州	0.072	0.047	0.121	0.012	0.252	28.71	18.58	48.13	4.58	畜禽养殖
阿克苏	0.104	0.046	0.112	0.010	0.272	38.27	16.83	41.31	3.59	生活污水、畜禽养殖
克州	0.575	0.051	0.362	0.003	0.992	57.98	5.19	36.51	0.32	生活污水、畜禽养殖
喀什	0.228	0.047	0.138	0.005	0.419	54.44	11.27	33.01	1.28	生活污水、畜禽养殖
和田	0.392	0.055	0.184	0.005	0.636	61.60	8.72	28.87	0.81	生活污水
阿拉尔	0.059	1.007	1.015	0.203	2.284	2.59	44.08	44.45	8.88	种植、畜禽养殖
铁门关	0.115	1.007	1.056	0.398	2.575	4.46	39.11	40.99	15.44	种植、畜禽养殖
图木舒克	0.127	1.007	1.016	0.129	2.280	5.59	44.18	44.56	5.67	种植、畜禽养殖
可克达拉	0.085	0.793	0.891	0.563	2.331	3.63	34.01	38.21	24.15	种植、畜禽养殖
双河	0.072	1.007	1.047	0.106	2.232	3.21	45.13	46.90	4.76	种植、畜禽养殖
五家渠	0.086	1.007	1.040	0.111	2.238	3.85	44.73	46.47	4.95	种植、畜禽养殖
胡杨河	0.190	1.001	1.045	0.233	2.476	7.69	40.69	42.20	9.42	种植、畜禽养殖
石河子	0.059	1.007	1.043	0.210	2.320	2.54	43.42	44.98	9.06	种植、畜禽养殖
白杨	0.063	0.738	0.783	0.003	1.588	3.98	46.45	49.37	0.20	种植、畜禽养殖
北屯	0.066	1.008	1.028	1.023	3.125	2.11	32.25	32.92	32.72	种植、畜禽养殖、水产养殖
新星	0.250	1.007	1.084	0.115	2.456	10.17	41.02	44.14	4.67	种植、畜禽养殖
昆玉	0.597	1.004	1.072	0.033	2.706	22.05	37.11	39.63	1.21	种植、畜禽养殖

生活污水污染型-低度负荷区:集中分布于和田。虽以生活污水为单一主导污染源,但因人口密度相对较低及排放强度有限,区域污染负荷整体呈现低度特征。

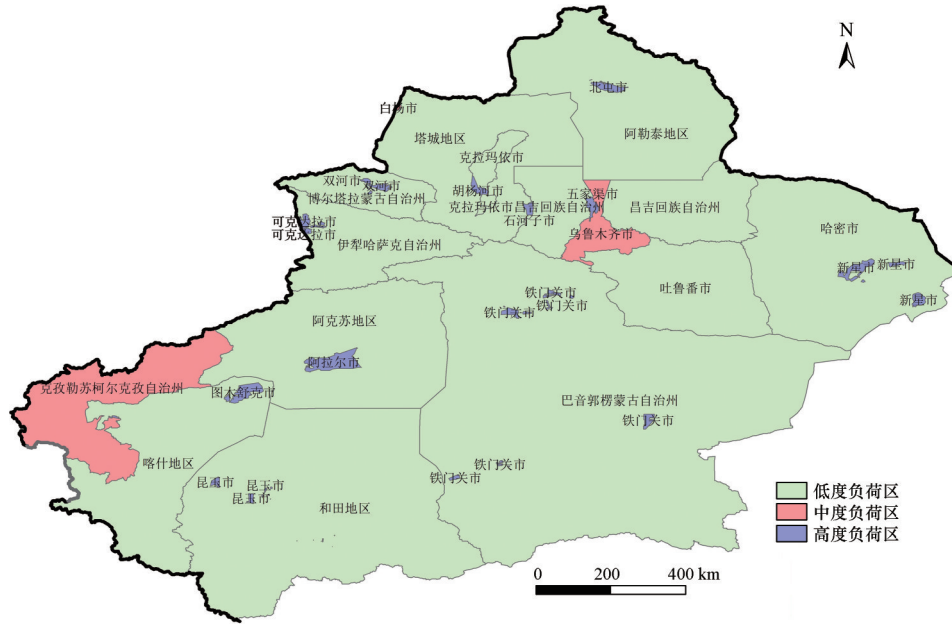
种植与畜禽养殖污染型-中度负荷区:典型代表为白杨。种植业面源污染物与畜禽养殖废弃物排放在此区域形成显著的叠加累积效应,致使污染负荷达到中度水平,成为农业复合污染治理需重点关注的区域。

种植与畜禽养殖污染型-高度负荷区:该分布广泛见于阿拉尔、铁门关等多处兵团师市。种植与养

殖活动并存且构成核心污染源,污染产出总量与扩散能力受限于当地环境条件与管理模式,整体污染负荷维持在高度水平,深刻反映了特定集约化或新兴农牧结合模式下的污染排放特征。

种植、畜禽养殖与水产养殖污染型-高度负荷区:高度集中于北屯。该区域种植业、畜禽养殖及水产养殖活动高度交织,多源污染物产生显著的协同放大效应,共同推动区域污染负荷攀升至高度水平,因而成为新疆农业面源污染治理任务最艰巨的核心攻坚区。

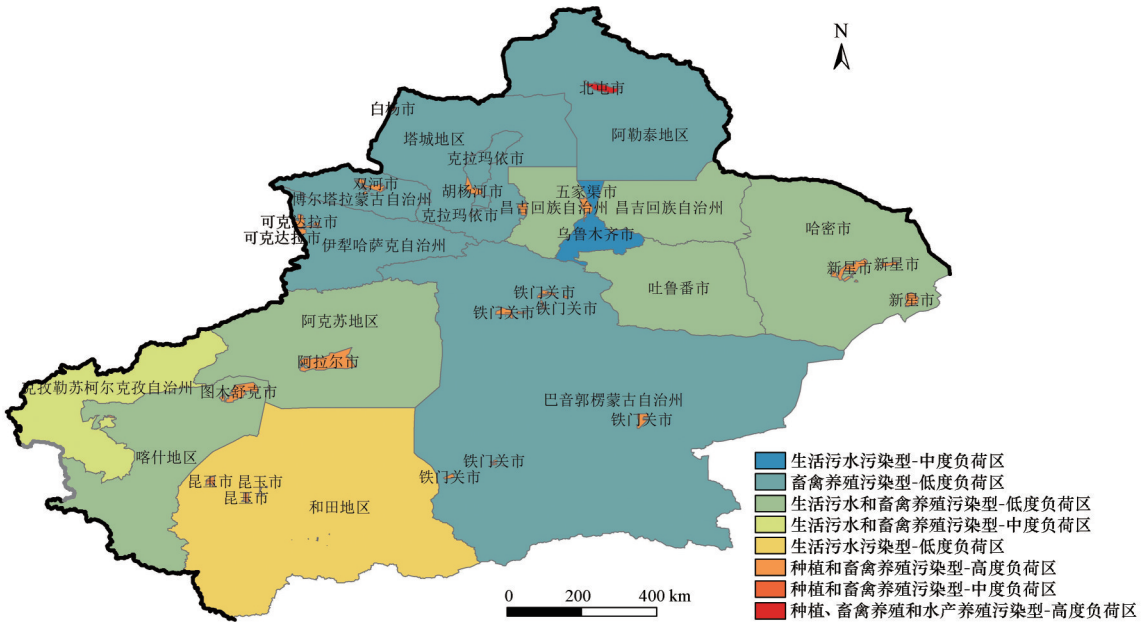
通过图5的空间呈现,8种污染控制区类型的分



注:基于国家地理信息公共服务平台标准地图(审图号:GS(2024)0650)制作,底图边界无修改

图4 新疆农业面源污染负荷强度分区

Fig.4 Zoning of agricultural non-point source pollution load intensity in Xinjiang



注:基于国家地理信息公共服务平台标准地图(审图号:GS(2024)0650)制作,底图边界无修改

图5 新疆农业面源污染控制分区

Fig.5 Agricultural non-point source pollution control zones in Xinjiang

布与区域产业结构、行政区划深度关联,为后续分区治理策略制定提供直观的空间指引,助力精准识别污染防控重点与方向。

2.5 新疆农业面源污染敏感性评价

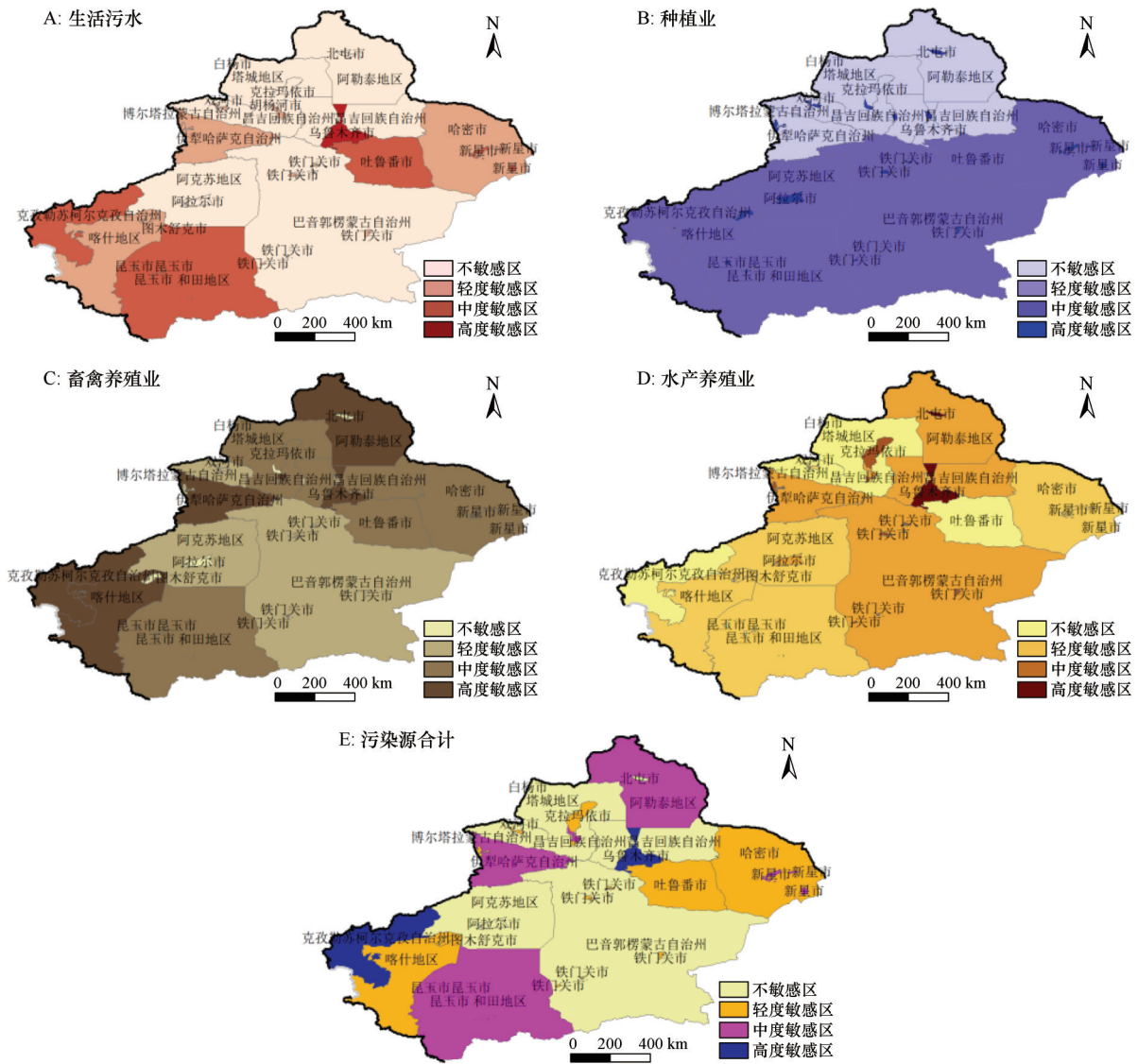
农业面源污染敏感性反映区域水环境系统在农业与农村经济活动压力下产生污染的潜在响应

程度,其评价有助于识别易受污染的地表水资源分布范围,明确敏感区域,进而为污染治理优先区的划定提供依据。本研究基于全疆 26 个地区 4 类污染源中 TN、TP、氨氮和 COD 的排放强度,结合植被覆盖度^[33]与降水^[34]两个自然因子,采用熵权法确定因子权重,并借助自然断点方法对流域非点源污染敏感性进行分级评价,将非点源污染敏感性划分为

高度敏感区、中度敏感区、轻度敏感区和不敏感区 4 个等级^[35-38]。

新疆生活污染敏感性呈现双核高敏-环状过渡-边缘复升的独特空间格局(图 6)。以乌鲁木齐、吐鲁番为核心的“双核”区域,因人口与经济活动的高度集聚,向环境输入的污染物总量巨大,故成为高度敏

感区;而外围的巴州、昌吉、阿勒泰、哈密等环状过渡带,污染物总量较少,且对污染物的消纳能力较强,因而表现为不敏感或低敏感区;与此形成对比的是,克州、喀什、和田等更外围的区域,由于自然条件恶劣与治污能力有限,其环境承载力再度降低,导致敏感性“复升”,重回中高敏感区。



注:基于国家地理信息公共服务平台标准地图(审图号:GS(2024)0650)制作,底图边界无修改

图 6 新疆农业面源污染敏感性评价

Fig. 6 Sensitivity assessment of agricultural non-point source pollution in Xinjiang

新疆种植业污染敏感性空间分布呈现显著的兵团-地方行政边界主导的南北分异格局。从敏感性分布看,兵团所属师市最为突出,除白杨市为中度敏感外,其余均属高度敏感区;其次为自治区所属的东疆及南疆区域,以中度敏感为主;敏感性最低的是北疆区域,主要分布于不敏感区。

新疆畜禽养殖业污染敏感性空间分布呈现明显的破碎化特征,不同敏感等级区域呈斑块状交错分布,且各等级在特定地理单元呈现显著集聚。高度敏感区主要集聚于北部阿勒泰、西南部喀什等区域,其环境约束力最强,对养殖活动的敏感性响应最为剧烈;中度敏感区分布广泛,覆盖和田、昆玉等多个

行政区域,环境约束力与敏感性响应处于中等水平;轻度敏感区占据一定空间范围,如阿克苏、巴州等地,其环境约束力与敏感性响应相对较弱;不敏感区零星散布于局部地域,环境约束力微弱,生态敏感性响应程度最低,环境承载潜力相对较大。

全疆水产养殖业污染敏感性空间分布呈现显著的局部集中、整体分散格局。高度敏感区分布范围极为有限,集中分布于乌鲁木齐和北屯,该区域水产养殖密度较高、集约化程度相对突出;中度敏感区主要分布于克拉玛依、博州等地区,该区域污染风险较高;轻度敏感区覆盖范围较广,广泛分布于阿克苏、巴州、塔城等区域;不敏感区主要分布于伊犁、阿勒泰、喀什、和田等生态本底良好、水资源约束明显或经济活动强度较低的区域。

全疆面源污染敏感性空间分布区域差异显著,高敏感区呈多中心分散,中、轻度及不敏感区广泛分布,污染敏感性未形成绝对主导的连片格局。克州和乌鲁木齐尽管同属高度敏感区,但两地主导的敏感污染源类型存在显著的差异。乌鲁木齐作为全疆人口最密集、城市化水平最高的核心城市,庞大的生活污水产生量对有限的水环境容量构成了巨大压力,同时,米东区相对集中的高密度水产养殖进一步加剧了水体富营养化风险与水质调控难度,共同塑造了该区域突出的综合污染敏感性;克州在特定的局部地域,畜禽养殖活动产生的粪便、污水等污染物,在当地地形、水文条件及有限的环境自净能力约束下,易于累积并形成显著的污染风险,成为该区域环境敏感性的核心来源。这种差异揭示了干旱区污染敏感性形成机制的复杂性与地域分异性。

2.6 地理探测器分析

2.6.1 单因子分析

行政区划、化肥施用强度、畜禽养殖密度、水产养殖密度和地区生产总值的 P 值小于0.01,人均日污水产生量、植被覆盖度和人口密度的 P 值小于0.05,通过了显著性检验,而降水和耕地占比 P 值均大于0.05,说明降水和耕地占比两个影响因子不对农业面源污染空间分异具有解释力(表3)。各因子的 q 值由大到小依次为:水产养殖密度>畜禽养殖密度>化肥施用强度>行政区划>人均日污水产生量>人口密度>地区生产总值>植被覆盖度,从影响因子 q 值来看,与产业模式相关的影响因子对面源污染空间分异解释力最强,与环境敏感度相关的影响因子解释力最弱,

表3 新疆农业面源污染产业模式-行政区划-环境敏感性中各驱动因子探测结果

Table 3 Detection results of various driving factors in the industrial model-administrative division-environmental sensitivity framework of agricultural non-point source pollution in Xinjiang.

影响因子	变量	q 值	P 值
行政区划	X_1	0.9064	0.0000
化肥施用强度	X_2	0.9330	0.0000
畜禽养殖密度	X_3	0.9340	0.0000
水产养殖密度	X_4	0.9590	0.0000
人均日污水产生量	X_5	0.7126	0.0491
植被覆盖度	X_6	0.4956	0.0474
降水	X_7	0.2500	0.4557
地区生产总值	X_8	0.6047	0.0045
人口密度	X_9	0.6279	0.0432
耕地占比	X_{10}	0.4253	0.5669

由此可知三者贡献产业模式>行政区划>环境敏感性。

2.6.2 交互作用分析

单因子分析用于衡量各驱动因子对农业面源污染空间分异的独立解释能力。然而,各因子通常并非孤立起作用,其交互作用可能产生协同增强或拮抗削弱等非线性效应。为此,本研究借助地理探测器中的交互探测功能,定量评估任意两因子共同作用时对污染空间分异解释力的变化。在10个单因子分析基础上进行两两交互探测,并借助Origin软件绘制热力图,以线性等间隔分级直观呈现产业模式、行政区划与环境敏感性中各因子间交互作用强度(图7)^[39-40]。结果显示,各驱动因子之间并非独立,均表现为双因子增强或非线性增强效应,表明任意两因子交互对农业面源污染空间分异的驱动作用均大于单一因子,即存在显著的协同增强效应。即产业模式-行政区划-环境敏感性中各因子耦合对农业面源污染空间分异驱动存在协同增强效应。

交互作用结果中,除 $X_6 \cap X_7$ 为非线性增强外,其余都为双因子增强,降水和植被覆盖度对农业面源污染空间分异的联合解释力显著大于二者独立解释力之和。这主要源于新疆干旱区的特殊背景:整体植被覆盖度较低,且植被类型以草地和耕地为主,林地比例较小,耕地面积的扩大导致化肥与农药施用量持续上升,土壤中污染物累积量增加,稀疏植被对

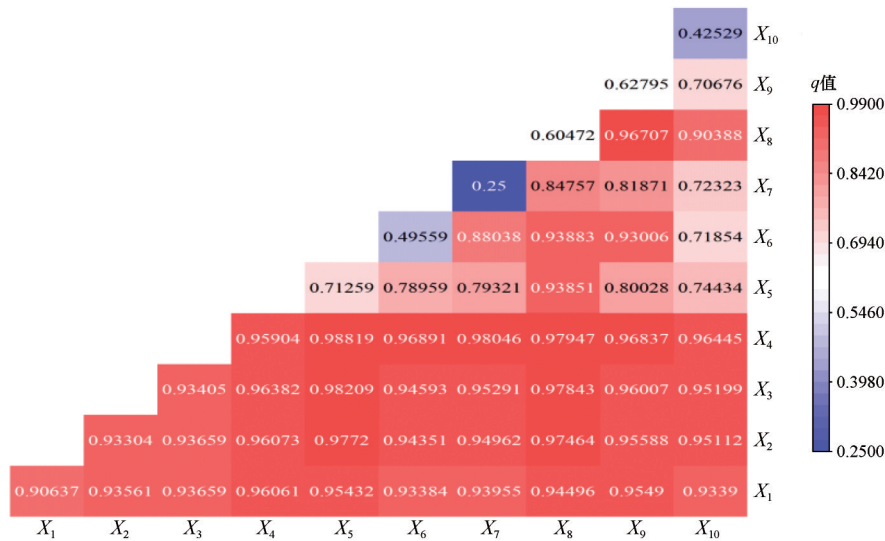


图 7 新疆农业面源污染产业模式-行政区划-环境敏感性中各驱动因子交互探测结果

Fig.7 Interaction detection results of various driving factors in the industrial model-administrative division-environmental sensitivity framework of agricultural non-point source pollution in Xinjiang

降水的截留和污染物吸附能力较弱,降水事件易形成地表径流,冲刷携带富集于地表的畜禽粪便、残留化肥及农药,造成污染物扩散流失,降水与低植被覆盖的协同作用显著放大了污染物的迁移通量,从而强化了农业面源污染的空间分异特征。

3 新疆农业面源污染分区治理对策综合体系

为实现新疆农业面源污染的精准、科学治理,本文构建一个以“污染源类型”为精准靶向,以“污染负荷强度”确定治理力度,以“环境敏感性”识别优先顺序,并以“驱动机制”实现协同增效的多维治理体系。

生活污水主导型:强化收集处理,攻坚人口密集区,核心是解决人口聚集区生活污水的直排与处理问题,治理策略需综合考量污染负荷与环境敏感性。治理区域以乌鲁木齐(等标污染负荷强度占比63.49%)、和田(占比61.60%)为主,生活污水是氨氮(贡献率40.92%)和COD(贡献率28.64%)的重要来源(表1),同时该区域也是生活污水中高度敏感区。在制定治理策略中以负荷强度定力度,以敏感性定优先:在乌鲁木齐,推进高标准污水处理厂建设与管网延伸,在和田,优先推广低成本、易运维的分散式污水处理技术;在响应驱动机制、实施经济激励方面,建立差异化生态补偿机制,对在上述敏感区投资建设污水处理设施或达标排放的企业与社区给予更高补偿,利用经济政策驱动环境效益提升。

种植业主导型:控源减排,聚焦兵团集约化农区,旨在从源头控制农区氮磷流失,其主战场在污染负荷与敏感性双高的兵团垦区。管控区域以所有兵团师市,特别是阿拉尔、铁门关等(种植业等标污染负荷强度占比均在39%以上)师市,种植业是TN的首要贡献源(51.70%)和TP的第二大贡献源(22.60%),该区域不仅是污染高度负荷区,同时也是种植业中高敏感区。整治过程中,在高度负荷区,将测土配方施肥和水肥一体化作为刚性制度执行,从源头削减氮磷投入;在农田-荒漠过渡带,大规模建设生态缓冲带和人工湿地,构筑“生态防火墙”。

畜禽养殖主导型:资源化利用,覆盖传统牧区与敏感地带,核心是推动畜禽粪污由“污染物”向“资源”转变,并重点防范对敏感水体的威胁。主要包括克拉玛依、伊犁、塔城等(畜禽养殖等标污染负荷强度占比均超过48%)地区,畜禽养殖是新疆污染负荷最高的源类,是TP(40.80%)、氨氮(41.10%)和COD(70.44%)的最大贡献源,同时其污染敏感性也处于中高水平。针对上述污染问题,治理策略应以“以地定养、种养结合”为核心,构建生态循环模式,在整治过程中要求规模化养殖场配套消纳土地,实现粪污全量还田、在传统养殖方面将畜禽养殖密度($q=0.934$)作为关键调控指标,强化养殖过程中的生态循环管理。

水产养殖主导型:生态养殖,严控局部高密度区,着眼于规范局部地区的水产养殖行为,防止水体富营养化。以北屯(污染负荷强度占比高达32.72%)、

可克达拉(占比24.15%)为主,水产养殖对全疆TP的贡献率达24.88%,同时也为水产养殖中高敏感区。在治理过程中应推广“三池两坝”尾水处理模式,并基于环境承载力评估科学压减养殖密度,部署系统性生态阻控措施,针对降水与植被覆盖度的非线性增强效应,在北屯等地的养殖区下游,建设人工湿地等生态工程,以应对强降水事件可能引发的污染冲击。

4 结论与启示

4.1 结论

新疆农业面源污染不仅在空间分布上呈现显著的地域不均衡性,其污染来源结构也表现出明显的区域分异特征。污染物排放量高值区分布于伊犁-喀什带,低值区为东疆、北疆经济发达区及南疆西部;全疆TN、TP排放强度大的区域多在兵团师市,COD排放强度高值区则涉及全区;污染物TN和TP主导源为种植业和畜禽养殖,COD高度集中于畜禽养殖,氨氮呈现畜禽养殖与生活污水双源并重;乌鲁木齐为生活污水污染型,克拉玛依、伊犁、塔城等为畜禽养殖污染型,吐鲁番、哈密、昌吉等为生活污水和畜禽复合污染型,阿拉尔、铁门关等11个师市为种植和畜禽复合污染型,北屯为种植、畜禽和水产多元复合污染型。

新疆农业面源污染区域差异显著。双河、石河子、阿拉尔、可克达拉、五家渠、铁门关、图木舒克、北屯、昆玉、胡杨河、新星为高度负荷区,乌鲁木齐、克州、白杨为中度负荷区,阿克苏、巴州、塔城、和田、克拉玛依、哈密、伊犁、吐鲁番、喀什、昌吉、阿勒泰、博州为低度负荷区。乌鲁木齐、和田、昆玉为生活污水高度敏感区,兵团师市种植业普遍高度敏感,阿勒泰、喀什为畜禽养殖高度敏感区,乌鲁木齐、北屯为水产养殖高度敏感区。乌鲁木齐为生活污水和水产养殖复合高敏感区,克州为畜禽养殖主导高敏感区,其他区域敏感等级分散,未形成连片格局。

行政区划、化肥施用强度等7个因子通过显著性检验,从影响因子 q 值来看,与产业模式相关的影响因子对面源污染空间分异解释力最强,与环境敏感度相关的影响因子解释力最弱,由此可知三者贡献为:产业模式>行政区划>环境敏感性。进一步的交互探测表明,10个驱动因子间都存在双因子增强和

非线性增强效应,体现产业模式-行政区划-环境敏感性中各因子耦合对农业面源污染空间分异存在协同增强作用,其中降水与植被覆盖度因新疆干旱区的特殊背景,其联合解释力显著大于独立作用之和,强化了污染空间分异特征。

4.2 启示

在产业模式方面,新疆农业面源污染产业模式特征显著。畜禽养殖、种植业是主要污染贡献源,且不同区域的污染类型存在明显差异,在治理过程中,需针对不同区域的主导污染源实施精准管控,对畜禽养殖污染区域,加强养殖废弃物的资源化利用和处理设施建设,降低养殖污染物排放。对种植业污染突出的区域,推广测土配方施肥、绿色植保等技术,减少化肥和农药的过量施用。对于水产养殖,规范养殖模式,控制养殖密度和投饵量。同时,针对复合污染型区域,制定综合性的产业调整方案,协调各类产业的污染治理,从源头优化产业结构,降低整体污染负荷。

在行政区划方面,新疆农业面源污染的空间分异与行政区划密切相关。兵团师市与自治区在污染物排放强度上存在明显差异。在治理工作中,需强化行政区划间的协同治理对策,兵团师市应重点针对种植业污染加强管控,推广生态种植模式。自治区则需聚焦COD排放强度较高的问题,加大生活污水处理力度。同时,建立跨行政区域的兵地污染联防联控体系,加强兵地融合,统筹调配治理资源,针对不同行政区划的污染特点制定差异化的治理目标,确保各区域污染整治工作的高效衔接与协同推进。

在环境敏感性方面,新疆农业面源污染的环境敏感性呈现显著区域差异。在治理过程中,需充分考虑区域环境敏感特征,对生活污水高度敏感区,应加快污水处理设施建设,提高污水收集和处理率。在种植业高度敏感区,需结合当地植被覆盖度低的特点,推广水土保持技术,增加植被对污染物的吸附和截留能力,针对降水与植被覆盖度的协同影响,可通过种植沙生植物、种草种树、退耕还植等措施改善植被状况,减少地表径流对污染物的冲刷迁移^[41]。同时,建立环境敏感性动态监测体系,根据敏感等级变化及时调整治理策略,提升污染治理的针对性和有效性。

参考文献：

- [1] 余东华,张明志.“异质性难题”化解与碳排放EKC再检验:基于门限回归的国际分组研究[J].中国工业经济,2016(7):57-73.
- [2] 郭利京,黄振英.淮河生态经济带农业面源污染空间分布及治理研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1746-1756.
- [3] 刘静,路凤,杨延钊,等.南四湖农业面源污染现状及控制措施[J].中国人口·资源与环境,2011,21(S1):292-295.
- [4] Abler D.Economic evaluation of agricultural pollution control options for China[J].Journal of Integrative Agriculture,2015,14(6):1045-1056.
- [5] 徐丽萍,杨其军,王玲,等.新疆地区农业面源污染空间分异研究[J].水土保持通报,2011,31(4):150-153.
- [6] 邢铭强,马可,陈彩亮,等.河西地区农业绿色发展水平测度及耦合协调提升路径[J].中国沙漠,2024,44(6):207-219.
- [7] 夏文浩,潘生亮,霍瑜,等.新疆农业面源污染的时空分异及动态演进:基于特色畜牧视角的再分析[J].资源开发与市场,2022,38(10):1190-1199.
- [8] 第二次全国污染源普查公报[J].环境保护,2020,48(18):8-10.
- [9] 赖斯芸,杜鹏飞,陈吉宁.基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J].清华大学学报(自然科学版),2004(9):1184-1187.
- [10] 谢培,宫健,陈诚.北京市农业面源污染负荷特征分析及控制分区[J].环境工程技术学报,2020,10(4):613-622.
- [11] 陈敏鹏,陈吉宁,赖斯芸.中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J].中国环境科学,2006(6):751-755.
- [12] 李光勤,牛雯琦,王江姣.黄河流域农业面源污染的演化特征与区域差异[J].中国沙漠,2024,44(6):146-154.
- [13] 陈武权,杨庆榜,杨斌.基于产排污系数法的鄱阳湖滨湖区总磷排放量测算研究[J].环境污染与防治,2022,44(7):960-965.
- [14] 董红敏,朱志平,黄宏坤,等.畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J].农业工程学报,2011,27(1):303-308.
- [15] 郭玉静,李红兵,王树明,等.滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算[J].环境科学,2023,44(3):1508-1518.
- [16] 陈晓丽,雷勇,黄国如.北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价[J].水资源保护,2019,35(2):44-48+53.
- [17] 丘丽清,吴根义,李想,等.基于等标污染负荷强度的海南省农村面源污染特征研究[J].农业资源与环境学报,2023,40(1):55-63.
- [18] 赖诗琪,安敏,安慧,等.长江经济带地级市农业面源污染源解析[J].中国农业资源与区划,2025,46(5):63-73.
- [19] 付意成,臧文斌,董飞,等.基于SWAT模型的浑太河流域农业面源污染物产生量估算[J].农业工程学报,2016,32(8):1-8.
- [20] 李威,赵祖伦,吕思思,等.基于InVEST模型的水质净化功能时空分异研究[J].灌溉排水学报,2022,41(3):105-113.
- [21] 杨金凤,冯爱萍,王雪蕾,等.海河流域农业面源污染潜在风险识别方法[J].中国环境科学,2021,41(10):4782-4791.
- [22] 逯颖,张建辉,李文君,等.长江经济带农业面源总磷污染时空特征分析[J].农业环境科学学报,2024,43(12):2752-2764.
- [23] 周晓琴,杨乐,杨令飞.新疆农业面源污染物排放量估算及分析[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1300-1307.
- [24] 杭伟,陆永兴,郭浩,等.西北荒漠区土壤氮素组分沿干旱梯度的空间变化[J].中国沙漠,2024,44(3):259-268.
- [25] 陆忠奇,赵竹君,何清.库尔勒市大气颗粒物浓度特征及来源[J].中国沙漠,2022,42(6):74-84.
- [26] 陈仪,夏立江,于晓勇.农村环境污染识别方法与应用研究[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2221-2227.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [28] 刘衡,朱铁辉,辛岭.农业现代化与城乡融合的耦合协调和驱动因素[J].农业现代化研究,2021,42(6):982-995.
- [29] 侯力,阿儒汗.中国区域人口增减的时空演变及驱动因素分析[J].人口学刊,2025,47(3):1-18.
- [30] 科学养鱼.新疆水利资源及水产养殖业概况:新疆水产研究所副所长杜劲松在2012《科学养鱼》通讯发行会上的发言[J].科学养鱼,2012(11):3.
- [31] 聂春霞,孙慧,闫海龙,等.新疆艾比湖流域经济社会水资源配置研究[J].经济地理,2014,34(1):156-160.
- [32] 罗万云,戎铭倩,郭世豪.资源依赖视域下荒漠化地区农户耕地利用效率差异及影响因素研究:基于新疆四地州农户调查数据[J].中国沙漠,2024,44(5):105-115.
- [33] 徐新良.中国月度NDVI、EVI250m数据集.资源环境科学数据注册与出版系统.
- [34] 彭守璋.中国1km分辨率月逐月降水量数据集(1901-2024).国家青藏高原科学数据中心.
- [35] 张淑荣,陈利顶,傅伯杰.农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J].水土保持学报,2001(2):56-59.
- [36] 刘康,欧阳志云,王效科,等.甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J].生态学报,2003,23(12):2711-2718.
- [37] 孙才志,杨磊,胡冬玲.基于GIS的下辽河平原地下水生态敏感性评价[J].生态学报,2011,31(24):7428-7440.
- [38] 周亮,徐建刚,孙东琪,等.淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J].环境科学,2013,34(2):547-554.
- [39] 徐晨曦,万红莲,何若楠,等.关中平原城市群脆弱性时空演变与驱动因子[J].中国沙漠,2023,43(6):111-120.
- [40] 李琛,吴映梅,高彬,等.高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测:以环洱海地区为例[J].经济地理,2022,42(4):220-229.
- [41] 潘昌祥,欧阳茜如,廖梦榆,等.西北干旱区沙漠化土地生态修复技术及沙产业的适用范围[J].中国沙漠,2023,43(5):155-165.

Spatial differentiation and governance mechanism of agricultural non-point source pollution in arid areas of Xinjiang

Ma Zixiang, Chao Weipeng, Zhu Ye

(*School of Economics and Management, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China*)

Abstract: In order to systematically analyze the spatial differentiation law and driving mechanism of agricultural non-point source pollution in Xinjiang, this study used the inventory analysis method and the equivalent pollution load intensity to calculate the average annual emissions and intensities of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen and chemical oxygen demand (COD) from planting, livestock and poultry breeding, aquaculture and domestic sewage in 26 regions of Xinjiang from 2010 to 2021. Then, ArcGIS spatial cluster analysis was used to divide the pollution load intensity zone and pollution control zone. At the same time, the vegetation coverage and precipitation factors were combined to quantify the pollution sensitivity by the entropy weight method. The results showed that: (1) The peak emission of TN, TP and COD was concentrated in Yili, the peak of ammonia nitrogen occurred in Kashgar, and Karamay was the lowest value area of various pollutants. On the whole, the "Ili-Kashgar" belt showed a high-value distribution, while the economically developed areas in eastern and northern Xinjiang were low-value areas. (2) Cluster analysis shows that except for Baiyang City, all corps divisions are high-load areas; Urumqi, Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture, and Baiyang City are medium-load areas; except for Urumqi and Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture, all regions of the autonomous region are low-load areas; Urumqi is a composite highly sensitive area for domestic sewage and aquaculture; Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture is a highly sensitive area dominated by livestock and poultry breeding; the sensitivity of planting in the corps area is the highest in the whole region. (3) In the single-factor driving force analysis, the industrial mode has the strongest driving effect on agricultural non-point source pollution in Xinjiang, and environmental sensitivity is the weakest, but the coupling of various factors in industrial mode-administrative division-environmental sensitivity has a synergistic enhancement effect on the spatial differentiation of non-point source pollution in Xinjiang.

Key words: Xinjiang; agricultural non-point source pollution; inventory analysis; equivalent pollution load intensity