

### 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 ..... 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 ..... 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 ..... 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 ..... 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 ..... 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 ..... 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估 ..... 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 ..... 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 ..... 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 ..... 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 ..... 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 ..... 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 ..... 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 ..... 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 ..... 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 ..... 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 ..... 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 ..... 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 ..... 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 ..... 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 ..... 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 ..... 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 ..... 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 ..... 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 ..... 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 ..... 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 ..... 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 ..... 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 ..... 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 ..... 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 ..... 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 ..... 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 ..... 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 ..... 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 ..... 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 ..... 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 ..... 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 ..... 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A ..... 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 ..... 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 ..... 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 ..... 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 ..... 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 ..... 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 ..... 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 ..... 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 ..... 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 ..... 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 ..... 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 ..... 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 ..... 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 ..... 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

# 黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征

李雪迎<sup>1</sup>, 杨曦<sup>2</sup>, 乔琦<sup>1</sup>, 刘丹丹<sup>1,3</sup>, 张玥<sup>1</sup>, 赵若楠<sup>1</sup>, 白璐<sup>1\*</sup>

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 甘肃省生态环境信息中心, 兰州 730030; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究黄河流域甘肃段工业废水污染的空间排放特征, 运用系统聚类法, 构建水污染物空间分类模型, 引入污染综合评价指数, 测算空间关联特征, 揭示黄河流域甘肃段工业水污染物排放空间集聚效应。结果表明, 2017年黄河流域甘肃段总工业企业数量为7 224家, 企业类型以小型和微型为主。化学需氧量(COD)排放主要集中在安定区、麦积区和西固区, 氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总氮(TN)和总磷(TP)排放主要集中在西固区、安宁区和红古区, 农副食品加工业、酒/饮料和精制茶制造业、化学原料和化学制品制造业及电力/热力生产和供应业是主要贡献源。黄河流域甘肃段57个县区分6种污染类型, 水环境污染综合评价指数在空间整体上存在明显空间正相关, 高值簇和低值簇集聚现象显著。研究结果可为管理部门制定差异化的水环境管控对策, 实行分区分级的精细化管理提供科学支撑。

**关键词:** 黄河流域甘肃段; 工业; 水污染物; 空间排放特征; 环境污染综合评价指数

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2459-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108253

## Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin

LI Xue-ying<sup>1</sup>, YANG Xi<sup>2</sup>, QIAO Qi<sup>1</sup>, LIU Dan-dan<sup>1,3</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, ZHAO Ruo-nan<sup>1</sup>, BAL Lu<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Gansu Information Center of Ecology and Environment, Lanzhou 730030, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the spatial discharge characteristics of industrial water pollutants in the Gansu section of the Yellow River basin, the systematic clustering method was used to construct the spatial classification model of water pollutants, and the environment pollution composite index was introduced to measure the spatial correlation characteristics and reveal the spatial agglomeration effect of industrial water pollutants in the Gansu section of the Yellow River basin. The results showed that there were 7 224 industrial enterprises in the Gansu section of the Yellow River basin in 2017, and the types of enterprises were mainly small and micro. The chemical oxygen demand (COD) emissions were mainly concentrated in the Anding District, Maiji District, and Xigu District, whereas ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) emissions were mainly concentrated in the Xigu District, Anning District, and Honggu District. The agricultural and sideline food processing industry, wine/beverage and refined tea manufacturing, chemical raw materials and chemical products manufacturing, and electricity/heat production and supply were the main contribution sources. The 57 districts in the Gansu section of the Yellow River basin could be divided into six pollution types. The environment pollution composite index had an obvious spatial positive correlation, and the clustering of high-value clusters and low-value clusters was significant. These results can provide scientific support for management departments to formulate differentiated water environment management and control countermeasures and to implement subregional and hierarchical refined management.

**Key words:** Gansu section of Yellow River basin; industry; water pollutants; spatial emission characteristics; environment pollution composite index

黄河是中国西北、黄淮海平原和华北平原的重要水源。甘肃地处黄河上游, 贡献了黄河60%的水资源量, 是黄河流域重要的水源涵养区和补给区<sup>[1]</sup>, 承担着保障下泄流量、水土保持和维系流域生态安全的多重功能<sup>[2]</sup>, 直接影响黄河中下游居民的生活和生产, 在推动黄河流域水资源保护和高质量发展等方面具有十分重要的意义。

随着经济的快速发展, 黄河流经甘肃省的9个市州(黄河流域甘肃段)工业产业结构变化明显<sup>[3]</sup>, 高耗水和重污染企业较多, 水环境压力增加, 导致河流水质下降和水生态系统退化, 生态保护与工业化的矛盾越发突出。黄河流域甘肃段的空间位置呈现既集中又分散的特征, 受社会经济发展水平和产业结构影响, 各地区工业行业水污染物排放及治理水平存在显著差异。由于城市水污染受邻近城市水污

染溢出效应影响<sup>[4]</sup>, 流域水体污染物[例如化学需氧量(COD)和氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )]排放往往存在显著的空间溢出效应<sup>[5]</sup>。揭示工业水污染物排放的空间分布特征及其溢出效应是制定城市群和流域水污染防治政策的关键。

近年来, 学者们在国家、流域和省域尺度上对工业水污染物空间排放特征进行了大量研究<sup>[6-8]</sup>。对黄河流域的研究主要集中在水质<sup>[9]</sup>和水污染物排放特征<sup>[10]</sup>, 水质与工业污染源响应关系<sup>[11]</sup>、地下水储量变化特征<sup>[12]</sup>、黄河流域水资源量和径流量影响因素<sup>[13-17]</sup>, 对黄河流域工业水污染物空间

收稿日期: 2021-08-23; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 生态环境部污染源普查动态更新调查、成果运用项目(2020zfcg01199)

作者简介: 李雪迎(1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为工业污染源管理, E-mail: lixy@caes.org.cn

\* 通信作者, E-mail: bailu@caes.org.cn

排放特征的研究较少. 然而, 在黄河流域甘肃段, 工业行业水污染物排放特征及空间效应影响均未见报道.

因此, 本文以黄河流域甘肃段为研究区域, 以 2017 年为基准年, 基于 15 种环境影响指标, 构建水污染物空间分类模型, 分析黄河流域甘肃段工业水污染物空间排放特征; 引入污染综合评价指数, 采用空间自相关分析揭示黄河流域甘肃段工业水污染物排放空间集聚效应, 以期为黄河流域甘肃段生态环境及污染现状调查等提供数据依据和支撑, 并为科学制定水环境管理政策提供参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究对象

甘肃省境内, 黄河干流介于东经  $101^{\circ}02'$  ~  $104^{\circ}43'$ , 北纬  $33^{\circ}20'$  ~  $37^{\circ}20'$  之间, 包括上游玛曲段

及下段积石关到黑山峡段, 主要支流有洮河、渭河、泾河和湟河水系. 黄河在甘肃“两进两出”流经 913 km, 总面积 14.32 万  $\text{km}^2$ ; 黄河流域甘肃段总人口 1 857.53 万人, 占全省人口的 70.74%<sup>[18]</sup>. 本文以兰州市、白银市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州、天水市、庆阳市、武威市、平凉市和定西市这 9 个市州 57 个县市区为研究区域(图 1), 基准年为 2017 年, 研究对象为工业企业排放至环境的 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、总氮(TN)和总磷(TP).

### 1.2 数据来源

本研究数据主要来源于甘肃年鉴、甘肃发展年鉴、中国统计年鉴、黄河水资源公报和甘肃省第二次全国污染源普查数据. 企业行业类别参照《国民经济行业分类》(GB/T 4754-2017), 企业规模依据《国家统计局关于印发〈统计上大中小微型企业划分办法(2017)〉的通知》.

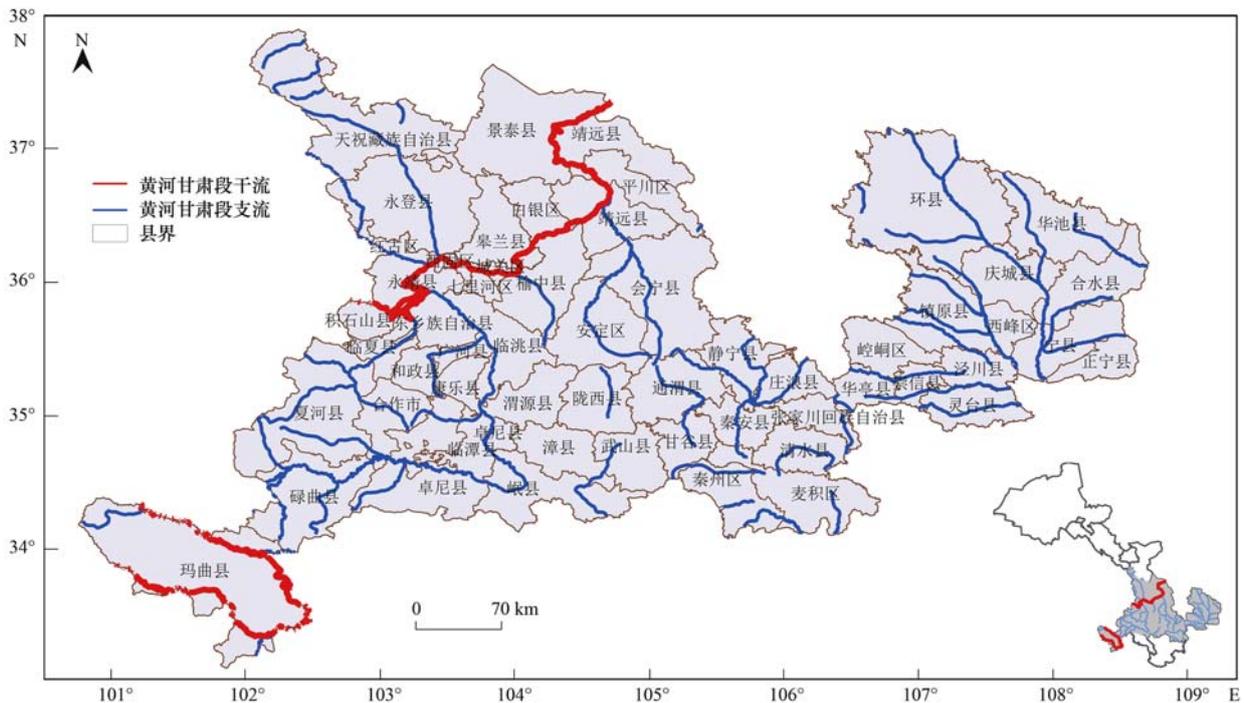


图 1 黄河流域甘肃段范围示意

Fig. 1 Gansu section of the Yellow River basin

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 环境污染综合评价指数

COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 指标性质、数量级和对环境的影响程度均有差异, 本研究运用商值法<sup>[19]</sup>对这 4 种水污染物进行标准化处理, 构建了黄河流域甘肃段环境污染综合评价指数 (environment pollution composite index, EPI). EPI 越小, 说明污染物综合排放量越大. 计算公式为:

$$X_{i,j} = \frac{X_{\max,j} - X_{i,j}}{X_{\max,j} - X_{\min,j}} + 1 \quad (1)$$

$$R_{i,j} = X_{i,j} \div \sum_{i=1}^m x_{i,j} \quad (2)$$

$$G_j = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m R_{i,j} \ln R_{i,j} \quad (3)$$

$$\omega_j = G_j \div \sum_{j=1}^n G_j \quad (4)$$

$$\text{EPI}_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \times R_{i,j} \quad (5)$$

式中,  $x_{i,j}$  为城市  $i$  第  $j$  项污染物排放指标的标准化值;  $X_{i,j}$  为城市  $i$  第  $j$  项污染物排放指标值;  $X_{\max,j}$  为第  $j$  项污染物指标的最大值;  $X_{\min,j}$  为污染物指标  $j$  的最

小值;  $R_{ij}$  为城市  $i$  第  $j$  项污染物排放指标比重;  $m$  为城市总数;  $n$  为污染物指标总数;  $G_j$  为变异系数;  $w_j$  为第  $j$  项污染物排放指标在环境污染综合评价指数中的权重;  $EPI_i$  为城市  $i$  环境污染综合评价指数。

### 1.3.2 空间分类方法

空间分类方法包括确定分类依据、开展空间分类、识别区域类别 3 个部分: ①结合环境管理需求, 选取与水污染排放水平关联较大或可直观表征水污染排放水平的指标, 包括水资源利用(新鲜水耗、年实际处理水量和废水回用量)、排放强度(COD 排放强度、 $\text{NH}_4^+$ -N 排放强度、TN 排放强度和 TP 排放

强度)、去除率(COD 去除率、 $\text{NH}_4^+$ -N 去除率、TN 去除率和 TP 去除率)、企业规模(大型企业数、中型企业数、小型企业数和微型企业数), 作为分类依据; ②采用系统聚类方法<sup>[20,21]</sup>, 按照特征相似原则, 将黄河流域甘肃段范围内 57 个县市区进行分类; ③识别各类区域主要特征, 确定区域类别。

根据各类区域主要特征, 将区域类别划分为 8 类, 分别为: 低治理水平区、中等治理水平区、高治理水平区、低排放强度区、中等排放强度区、高排放强度区、低产生强度区、高产生强度区。各类区域类别识别准则见表 2。

表 2 黄河流域甘肃段各类区域类别识别准则

Table 2 Identification criteria of various regional categories in Gansu section of the Yellow River basin

序号	区域类别	划分依据
1	低治理水平区	COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 去除率均低于黄河流域甘肃段平均水平
2	中等治理水平区	COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 去除率均高于黄河流域甘肃段平均水平且低于平均水平 1.2 倍
3	高治理水平区	COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 去除率均高于黄河流域甘肃段平均水平 1.2 倍
4	低排放强度区	参照低治理水平区识别准则
5	中等排放强度区	参照中等治理水平区识别准则
6	高排放强度区	参照高治理水平区识别准则
7	低产生强度区	COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 去除率和排放强度均低于黄河流域甘肃段平均水平
8	高产生强度区	COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 去除率和排放强度均高于黄河流域甘肃段平均水平

### 1.3.3 空间自相关分析

本研究采用空间自相关分析来揭示黄河流域甘肃段 57 个县市区 EPI 值的集聚程度。

空间自相关可以分为全局空间自相关和局部空间自相关<sup>[22]</sup>。

全局空间自相关<sup>[23]</sup>是指空间单元属性在空间位置上的相互依赖关系, 是空间整体上集聚程度的一种度量方式, 常用 Moran's  $I$  指数来度量, 其值为  $[-1, 1]$ , 正、负值分别表明空间单元属性分布具有正、负的空间自相关。计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij} (EPI_i - \overline{EPI}) (EPI_j - \overline{EPI})}{S^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (6)$$

局部空间自相关<sup>[23]</sup>分析是对局部空间集聚程度进行判断, 主要通过空间集聚图和显著性水平图表示。计算公式为:

$$I_i = \frac{EPI_i - \overline{EPI}}{S^2} \cdot \sum_{j=1}^m W_{ij} (EPI_j - \overline{EPI}) \quad (7)$$

式中,  $m$  为城市总数;  $W_{ij}$  为空间权重;  $EPI_i$  和  $EPI_j$  分别为城市  $i$  和城市  $j$  的 EPI 值;  $\overline{EPI}$  为 EPI 值的平均值;  $S^2$  为 EPI 值的方差值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物排放特征分析

#### 2.1.1 空间特征分析

黄河流域甘肃段 2017 年工业企业有 7 224 家,

兰州市工业企业数量最多(2 335 家), 其次为定西市(1 327 家)。各类企业规模数量依次为微型企业 > 小型企业 > 中型企业 > 大型企业, 小型和微型企业占 95.75%。COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 排放量分别为 12 218.58、186.22、977.63 和 42.32 t, 57 个县市区水污染物排放分布如图 2 所示。安定区、麦积区和西固区 COD 排放量最大, 3 个区排放总量占黄河流域甘肃段的 50.25%; 西固区、安宁区和红古区  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 排放量最大, 3 个区  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 排放总量分别占黄河流域甘肃段的 44.96%、70.65% 和 61.20%。

EPI 值是对各县区 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 这 4 种水污染物排放的综合评价结果, 结果如图 3 所示。56.14% 的县区 EPI 值在  $[0.0180, 0.0181]$ , 污染排放较低。西固区 EPI 值最低, 水污染排放最严重, 其次是安宁区、安定区、红古区和麦积区, EPI 值在  $[0.0122, 0.0160]$ , 4 种水污染物综合评价结果与其空间排放特征基本一致。

#### 2.1.2 行业特征分析

黄河流域甘肃段工业行业 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 排放贡献如图 4 所示, 主要工业行业废水处理技术使用情况如图 5 所示。农副食品加工业、酒/饮料和精制茶制造业, 化学原料和化学制品制造业、电力/热力生产和供应业是主要排放源。各工业行业对 TN 的排放贡献差别不大, 但农副食品加工业的 COD 贡献占比达 62.90%, 酒/饮料和精制茶制造业

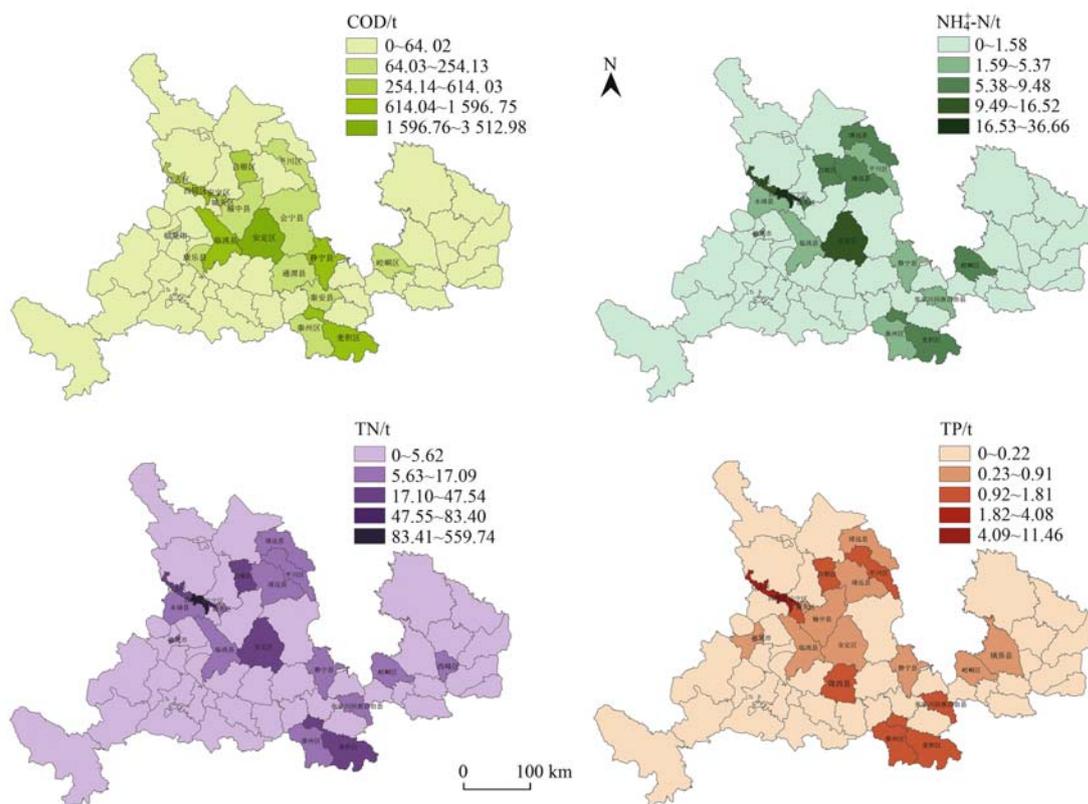


图2 黄河流域甘肃段水污染物排放分布

Fig. 2 Distribution of water pollutant emissions in Gansu section of the Yellow River basin

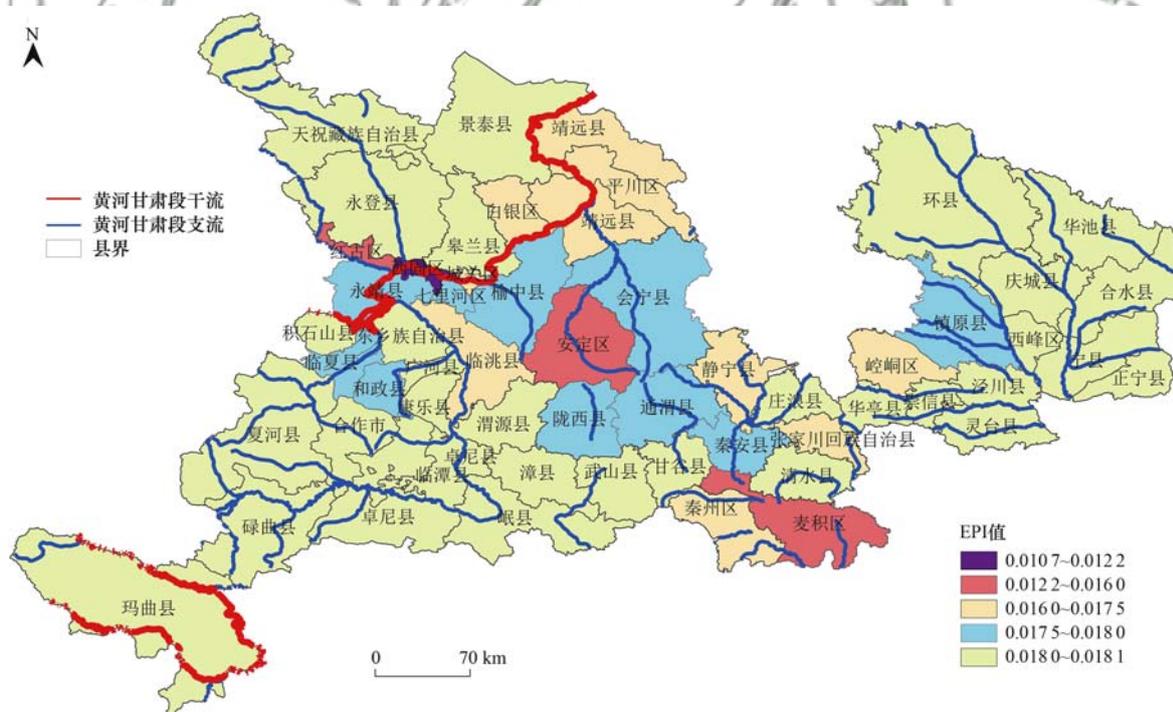
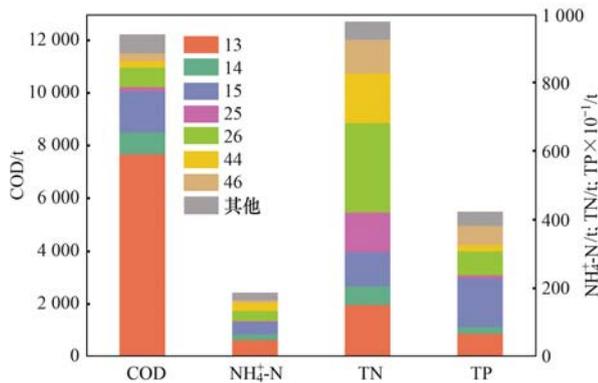


图3 黄河流域甘肃段各县区 EPI 值

Fig. 3 EPI values of districts in Gansu section of the Yellow River basin

对 TP 的贡献占比达 33.89%。由图 5 可知,黄河流域甘肃段主要工业行业水污染处理技术以沉淀分离法<sup>[24]</sup>为主,占比分别为 31.71%、26.40%、22.45% 和 25.28%。该类技术简单、成熟实用,成本较低,主

要用于处理废水中含有大量可降解的固体物质,但沉淀分离法不能去除胶体或营养物质,去除效果有限,可通过强化一级处理技术<sup>[25]</sup>或增加二级处理技术进行提升。



13. 农副食品加工业; 14. 食品制造业; 15. 酒/饮料和精制茶制造业; 25. 石油/煤炭及其他燃料加工业; 26. 化学原料和化学制品制造业; 44. 电力/热力生产和供应业; 46. 水的生产和供应业

图4 黄河流域甘肃段工业行业水污染物排放贡献

Fig. 4 Distribution of industrial pollutants in Gansu section of the Yellow River basin

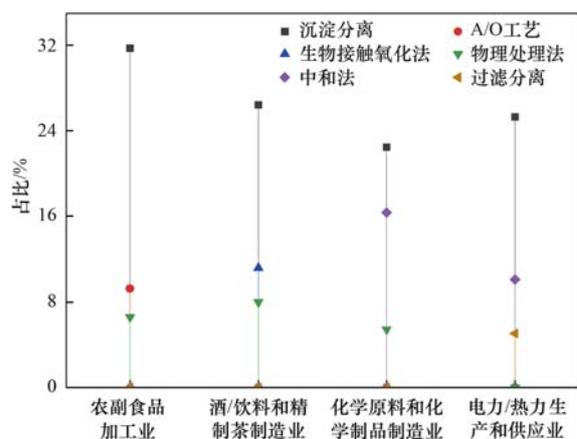


图5 黄河流域甘肃段主要工业行业处理技术使用情况

Fig. 5 Utilization of treatment technologies in major industries in Gansu section of the Yellow River basin

## 2.2 空间分类结果

本研究通过SPSS软件采用系统聚类中的组间

联接法进行聚类分析,组间距离采用皮尔逊相关性度量,结果见图6,黄河流域甘肃段57个县区共分为6个区域.各区域水污染物指标值见表2.

表2 黄河流域甘肃段各区域水污染物指标值

Table 2 Classification results of 57 counties in Gansu section of the Yellow River basin

指标	I. 低治理水平区	II. 低排放强度区	III. 中等治理水平-低排放强度区	IV. 低产生强度区	V. 高排放强度区	VI. 高治理水平-低排放强度区	平均值
废水排放量/万 m <sup>3</sup>	165.56	288.87	98.53	6.90	30.24	11.90	92.50
COD 排放强度/kg·亿元 <sup>-1</sup>	19 237.94	1 540.48	3 850.86	7 735.01	22 238.71	1 393.99	9 380.77
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N排放强度/kg·亿元 <sup>-1</sup>	94.24	35.35	68.12	45.97	392.46	47.32	114.49
TN 排放强度/kg·亿元 <sup>-1</sup>	352.37	104.29	195.37	215.57	922.89	129.32	316.31
TP 排放强度/kg·亿元 <sup>-1</sup>	5.05	9.81	9.60	8.54	79.36	12.56	20.50
大型企业数/个	1.00	3.50	1.89	0.00	0.22	0.11	0.96
中型企业数/个	3.54	10.50	9.22	1.50	2.22	2.06	4.42
小型企业数/个	24.08	37.83	77.33	22.50	18.78	18.22	31.19
微型企业数/个	108.77	62.50	199.44	53.50	56.44	52.22	90.16
取水量/万 m <sup>3</sup>	4 002.00	1 198.02	321.71	61.13	160.36	103.58	1 149.82
废水回用量/万 m <sup>3</sup>	16.70	534.15	51.57	71.26	39.76	17.93	82.62
COD 去除率/%	21.03	84.58	79.76	76.57	50.61	90.41	72.31
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N去除率/%	33.71	74.71	73.14	63.20	54.09	85.21	70.76
TN 去除率/%	19.73	64.47	66.68	60.61	26.97	79.90	63.72
TP 去除率/%	34.95	33.43	74.93	42.78	62.50	76.94	59.77

I 区为低治理水平区,包括 13 个县区,79.17%为微型企业,是6类区域中微型企业占比最高的区域,该区域水污染排放主要集中在兰州市的西固区和定西市的安定区.其中,西固区 TN 排放贡献率高达 57.25%,去除率仅为 13.32%,安定区 COD 排放贡献率达 28.75%,去除率仅为 5.78%.此外,该区域工业行业的废水回用率普遍较低,平均为 9.16%,也是6类区域中废水回用率最低的区域,表明该区域工业用水效率有待提升.

II 区为低排放强度区,包括 6 个县区,是6类区域中废水排放量和回用量最高、微型企业占比最低的区域.除 TP 外,COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 去除率均属于中等治理水平,表明该区域企业规模较大,清洁生产

能力较高,环境效益较好<sup>[26]</sup>.

III 区为中等治理水平-低排放强度区,包括 9 个县区,麦积区排放强度水平为 9 个县区中最高.受产业结构影响,该类区域产生工业废水的企业主要以轻工类为主,尽管水污染物的排放强度较低,但其治理水平仍有较大提升空间.其中,麦积区主要排放源为农副食品加工业,该行业 4 种水污染物去除率均不到 15%,治理水平较低.

IV 区为低产生强度区,包括 2 个县区.该类区域企业清洁化水平较高,水污染物排放强度较低,但治理水平较差,尤其是 TN,去除率仅为 26.97%.农副食品加工业和酒、饮料和精制茶制造业是该类区域主要水污染物贡献源.

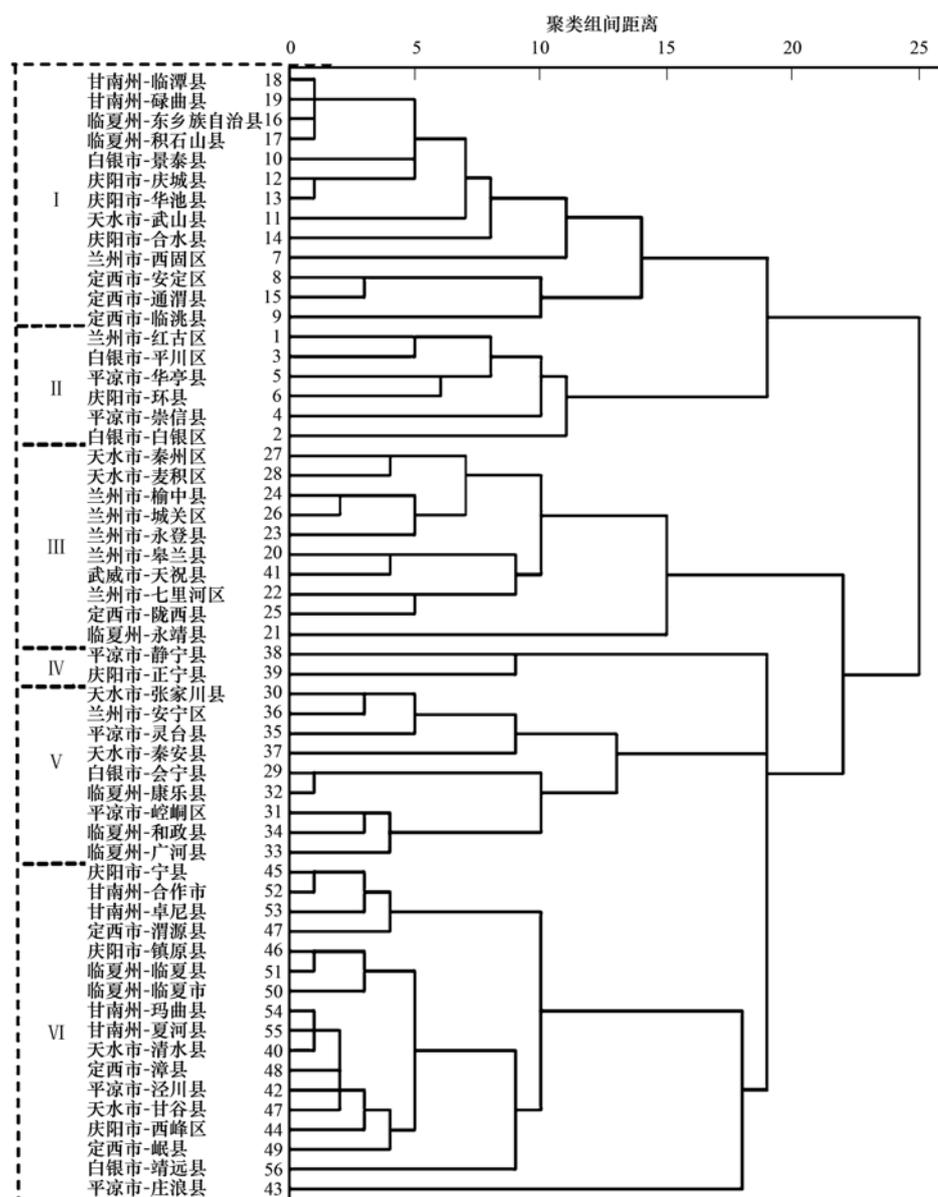


图6 黄河流域甘肃段各县区聚类树状图

Fig. 6 Clustering tree of counties in Gansu section of the Yellow River basin

V区为高排放强度区,包括9个县区,是6类区域中水污染排放强度最高的区域.该类区域的产业结构以农副食品加工业、食品制造业为主.其中,灵台县农副食品加工业、食品制造业,秦安县食品制造业,张家川回族自治县皮革/毛皮/羽毛及其制品和制鞋业水污染物的去除效率远低于黄河流域甘肃段水污染物的平均去除水平,其治理能力亟待提升.

VI区为高治理水平-低排放强度区,包括18个县区.该类区域水污染物治理水平普遍较高,且万元工业总产值的污染物排放量小.仅甘谷县、卓尼县、渭源县的医药制造业水污染治理能力略低,其去除率约在50~70%.

### 2.3 水污染物空间自相关分析

采用GeoDa空间分析工具建立空间权重矩阵,通过单变量(EPI)的Moran's  $I$  指数<sup>[27]</sup>测算全局空

间关联特征. EPI的Moran's  $I$  指数为0.2320,并通过显著性水平检验( $P = 0.0010$ ).这表明,57个县区水环境污染综合评价指数存在明显空间正相关,水环境污染综合评价指数高值簇和低值簇集聚现象显著.

水污染物污染指数局部空间自相关LISA集聚(图7),用于表征区域水环境污染综合评价指数与其邻域水污染指数之间属于高-高(high-high)和低-低(low-low)的空间正相关,或者低-高(low-high)和高-低(high-low)的空间负相关,或者无显著的空间相关性(即空间随机模式),图7表明黄河流域甘肃段污染物排放的空间集聚效应非常显著<sup>[28]</sup>.其中,高-高集聚区共有5个县区,分别为华池县、合水县、岷县、卓尼县和碌曲县,其水环境污染综合评价指数高,达到0.0181,均高于平均值(0.0175),

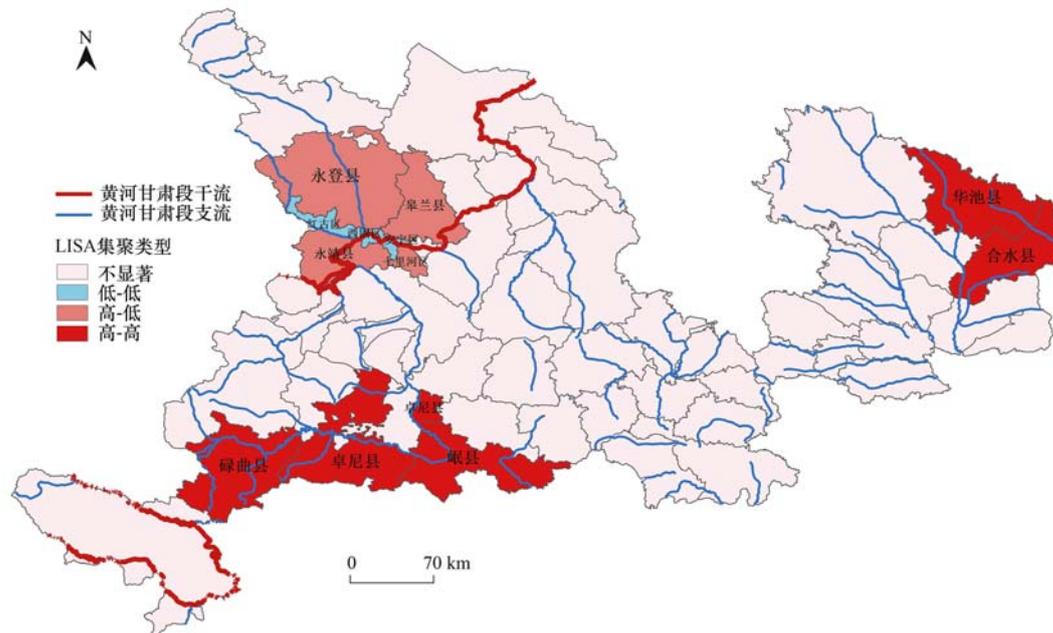


图7 黄河流域甘肃段 EPI 局部空间自相关 LISA 集聚

Fig. 7 Local spatial autocorrelation LISA cluster map of EPI in Gansu section of Yellow River basin

表现出水污染物排放量较低,空间集聚性强,与临近县区水环境污染状况紧密联系,辐射和共轭作用突出.低-低聚集区主要分布在兰州,分别为西固区、安宁区和红古区,其水环境污染综合评价指数均低于平均值,这些地区经济发展水平高,与周边联系较强,水体污染物排放量较大,其 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 排放量分别达到黄河甘肃段总量 21.08%、44.96%、70.65% 和 61.20%,是水环境管理重点地区.高-低聚集区主要分布在兰州,分别为七里河区、永登县、皋兰县和永靖县,其水环境污染综合评价指数均高于平均值(0.0175),这些地区经济发展水平较高,水污染物去除率较高,水污染物排放量较小,与邻近县区呈空间负相关.

### 3 结论

(1)COD 排放源主要集中在定西市的安定区、天水市的麦积区和兰州市的西固区, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 排放源主要集中在兰州市的西固区、安宁区和红古区;4 种水污染物排放源主要是农副食品加工业、酒/饮料和精制茶制造业、化学原料和化学制品制造业、电力/热力生产和供应业,沉淀分离法是其主要处理技术,占比分别为 31.71%、26.40%、22.45% 和 25.28%.

(2)黄河流域甘肃段 57 个县区共分为 6 个区域,根据各区域主要排放特征以及区域类别识别准则,6 个区域类别分别为:Ⅰ.低治理水平区、Ⅱ.低排放强度区、Ⅲ.中等治理水平-低排放强度区、Ⅳ.低产生强度区、Ⅴ.高排放强度区、Ⅵ.高治理水平-

低排放强度区.

(3)黄河流域甘肃段各地工业企业发展水平不均衡,水污染排放集聚,产业结构亟需优化,部分地区农副食品加工业和食品制造业等行业的水污染物综合污染治理能力相对落后.

(4)57 个县区水环境污染综合评价指数存在明显空间正相关,水环境污染综合评价指数高值簇和低值簇集聚现象显著.

#### 参考文献:

- [1] 王星星, 邓晓红. 黄河流域甘肃段绿色高质量发展的认识与思考[J]. 甘肃科技, 2020, 36(23): 6-8.
- [2] 农工党甘肃省委. 黄河流域甘肃段生态保护与高质量发展的若干思考[J]. 前进论坛, 2021, (2): 31.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002-2020.
- [4] Sheng J C, Tang W Z. Spatiotemporal variation patterns of water pollution drivers: the case of China's south-north water transfer project[J]. Science of the Total Environment, 2021, 761, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143190.
- [5] Zhou K, Wu J X, Liu H C. Spatiotemporal variations and determinants of water pollutant discharge in the Yangtze River Economic Belt, China: a spatial econometric analysis [J]. Environmental Pollution, 2021, 271, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116320.
- [6] 石敏俊, 郑丹, 雷平, 等. 中国工业水污染排放的空间格局及结构演变研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 1-7.  
Shi M J, Zheng D, Lei P, et al. Evolution of spatial pattern of industrial wastewater pollution emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(5): 1-7.
- [7] Liu D D, Bai L, Qiao Q, et al. Anthropogenic total phosphorus emissions to the Tuojiang River basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126325.

- [ 8 ] 张静, 段扬, 张伟, 等. 京津冀区域工业水污染排放空间密度特征研究[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(1): 115-121.  
Zhang J, Duan Y, Zhang W, *et al.* Spatial density estimation on the industrial water pollution emission in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, **27**(1): 115-121.
- [ 9 ] Zhao M M, Wang S M, Chen Y P, *et al.* Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches[J]. Science of the Total Environment, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137861.
- [ 10 ] 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[J]. 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[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(12): 2683-2694.
- [ 11 ] 刘鸿志, 王光镇, 马军, 等. 黄河流域水质和工业污染源研究[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(3): 18-27.  
Liu H Z, Wang G Z, MA J, *et al.* Water quality status and industrial pollution sources in the Yellow River basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(3): 18-27.
- [ 12 ] Lin M, Biswas A, Bennett E M. Spatio-temporal dynamics of groundwater storage changes in the Yellow River basin [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **235**: 84-95.
- [ 13 ] Xie J K, Xu Y P, Wang Y T, *et al.* Influences of climatic variability and human activities on terrestrial water storage variations across the Yellow River basin in the recent decade[J]. Journal of Hydrology, 2019, **579**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124218.
- [ 14 ] Wang W, Zhang Y Y, Tang Q H. Impact assessment of climate change and human activities on streamflow signatures in the Yellow River basin using the Budyko hypothesis and derived differential equation[J]. Journal of Hydrology, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125460.
- [ 15 ] Yin L C, Feng X M, Fu B J, *et al.* A coupled human-natural system analysis of water yield in the Yellow River basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143141.
- [ 16 ] Li G Y, Jiang G H, Zhang Y H, *et al.* Whether land greening in different geomorphic units are beneficial to water yield in the Yellow River basin? [J]. Ecological Indicators, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106926.
- [ 17 ] Omer A, Elagib N A, Ma Z G, *et al.* Water scarcity in the Yellow River basin under future climate change and human activities[J]. Science of the Total Environment, 2020, **749**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446.
- [ 18 ] 《甘肃发展年鉴》编委会. 甘肃发展年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [ 19 ] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2796-2809.  
Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, *et al.* Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the upper Beiyun River basin using different weighting methods[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- [ 20 ] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 PM<sub>2.5</sub> 化学组分时空分布及聚类分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4764-4773.  
Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM<sub>2.5</sub> in Wuhan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [ 21 ] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3291-3303.  
Ma X X, Gong C, Guo J X, *et al.* Water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the lower Yangtze River; considering the Qinhuai River Catchment [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3291-3303.
- [ 22 ] Hu X J, Ma C M, Huang P, *et al.* Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection—a case of Weifang City, China [J]. Ecological Indicators, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107464.
- [ 23 ] 汪可可, 康平, 周明卫, 等. 四川盆地臭氧浓度空间分异及驱动因子研究 [J]. 中国环境科学, 2020, **40**(6): 2361-2370.  
Wang K K, Kang P, Zhou M W, *et al.* Spatial differentiation and driving factors of ozone concentration in Sichuan basin [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(6): 2361-2370.
- [ 24 ] Ullah A, Hussain S, Wasim A, *et al.* Development of a decision support system for the selection of wastewater treatment technologies[J]. Science of the Total Environment, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139158.
- [ 25 ] 张智, 邱维, 张国庆. 城市污水强化一级处理技术及发展趋势[J]. 重庆环境科学, 2001, **23**(1): 46-49.  
Zhang Z, Qiu W, Zhang G Q. Technology and development trend of the enhanced primary treatment of municipal wastewater [J]. Chongqing Environmental Science, 2001, **23**(1): 46-49.
- [ 26 ] 李大元, 孙妍, 杨广. 企业环境效益、能源效率与经济绩效关系研究[J]. 管理评论, 2015, **27**(5): 29-37.  
Li D Y, Sun Y, Yang G. The relationships among corporate environmental performance, energy efficiency and economic performance[J]. Management Review, 2015, **27**(5): 29-37.
- [ 27 ] 丁洋, 赵进勇, 张晶, 等. 松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2232-2239.  
Ding Y, Zhao J Y, Zhang J, *et al.* Spatial differences in water quality and spatial autocorrelation analysis of eutrophication in Songhua Lake [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2232-2239.
- [ 28 ] Zhang J, Zhang K, Zhao F. Research on the regional spatial effects of green development and environmental governance in China based on a spatial autocorrelation mode [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2020, **55**: 1-11.

## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)