

· 调查与评价 ·

京杭运河江苏段底栖动物群落结构调查

李娣^{1,2}, 李旭文¹, 姜晟¹, 谢飞², 吕学研¹, 厉以强¹

(1. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210041;

2. 江苏省苏力环境科技有限责任公司, 江苏 南京 210036)

摘要:通过2018年5月在京杭运河江苏段布设23个采样点调查底栖动物群落结构和生境状况,并用Shannon-Wiener多样性指数评价底栖动物多样性,用聚类法分析采样点底栖动物群落结构相似性,用ANOSIM分析检验聚类组差异性,用SIMPER对聚类组作主要特征物种分析。结果显示:23个采样点共采集底栖动物42种,其中甲壳纲4种、软体动物16种、多毛纲2种、蛭纲2种、昆虫纲4种(均为摇蚊类)、寡毛纲14种。聚类分析将23个采样点分成4组,ANOSIM分析检验表明各聚类组底栖动物群落结构具有显著差异($p < 0.05$),底质类型和水生植被等生境状况是影响京杭运河江苏段底栖动物群落结构的重要原因。

关键词:底栖动物;群落结构;生物多样性;京杭运河江苏段

中图分类号:Q145;X522

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)01-0023-05

Survey on Macrobenthic Community Structure in Jiangsu Segment of Grand Canal

LI Di^{1,2}, LI Xu-wen¹, JIANG Sheng¹, XIE Fei², LV Xue-yan¹, LI Yi-qiang¹

(1. Jiangsu Environment Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210041, China;

2. Jiangsu Suli Environmental Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: The macrobenthic community structure and habitat situation at 23 sampling sites in Jiangsu Segment of Grand Canal were surveyed in May of 2018. The macrobenthic diversity was evaluated by Shannon-Wiener diversity index. The similarity of macrobenthic community compositions in each sampling site were analyzed by cluster method, the differences of cluster groups were checked by ANOSIM, and the main species in cluster groups were identified by SIMPER. Results showed that there were 42 taxa of macrobenthic animals in 23 sampling sites, including 4 Crustacea, 16 Mollusca, 2 Polychatea, 2 Hirudinea, 4 Chironomidae, and 14 Oligochaeta. In addition, 23 sampling sites were divided into 4 groups by clustering analysis, the macrobenthic community compositions were significant different between the 4 groups ($p < 0.05$) according to ANOSIM analysis. Habitats and aquatic vegetation were the main factors influencing the macrobenthic community structure in Jiangsu Segment of Grand Canal.

Key words: Zoobenthos; Community structure; Biological diversity; Jiangsu Segment of Grand Canal

底栖动物因生活史的全部或大部分时间生活于水体底部,随着环境的变化,底栖动物群落结构也会相应发生改变^[1-2]。因此,底栖动物常被用作指示水环境质量^[3-4]。京杭运河是世界上里程最长、工程最大的古代运河,也是最古老的运河之一,是历史上著名的“南粮北运”通道。京杭运河江苏段是运河航运价值最高的水道,是国家南北水运的

大动脉。以往对于京杭运河江苏段全段底栖动物群落调查甚少,大多为单独某个市辖段区域的研

收稿日期:2020-03-27;修订日期:2020-12-18

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2018ZX07208-002);江苏省环保科研课题基金资助项目(2018004)

作者简介:李娣(1983—),女,江苏沭阳人,高级工程师,博士研究生,研究方向为水生态健康评价。

究,如李勇等^[5]研究了京杭运河徐州段,张皓等^[6]研究了常州段,王亚超等^[7]研究了苏州段,均未系统地分析京杭运河江苏段底栖动物群落结构和空间分布特征。今于2018年5月对京杭运河江苏段23个采样点开展底栖动物群落调查,采用Shannon-Wiener多样性指数评价各区域的底栖动物群落多样性,用多参数方法分析区域内底栖动物群落结构的区域异质性^[8-9],并初步探讨导致该差异的原因,为运河环境管理和水资源保护提供有价值的参考依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京杭运河江苏段全长683 km,占京杭运河全长的1/3,其从北至南穿过江苏省的8个省辖市(徐州、宿迁、淮安、扬州、镇江、常州、无锡、苏州),占江苏省省辖市数量的2/3。

1.2 采样点布设

2018年5月,在京杭运河江苏段共设置23个采样点(见图1)。其中,采样点JH01—JH05位于徐州、JH06—JH09位于宿迁、JH10—JH12位于淮安、JH13—JH14位于扬州、JH15位于镇江、JH16—JH18位于常州、JH19—JH22位于无锡、JH23位于苏州。同时,采样点JH01—JH13属于淮河流域、JH14—JH15属于长江流域、JH16—JH23属于太湖流域。

1.3 底栖动物样品的采集与处理

为了保证调查结果能够客观、准确地反映区域水生态状况,每个采样点都设置左、中、右岸3个分

区进行样品的采集。使用1/16 m²的彼得逊采泥器进行底栖动物样品采集,每个采样点每个分区采集底栖动物样品两三次,并将样品混合;样品经40目的筛网现场分选,然后置于白色解剖盘中挑选出底栖动物样本,并用10%的福尔马林溶液固定,带回实验室分析鉴定。软体动物肉眼观察,寡毛类与摇蚊类制片用显微镜放大到400倍观察,其他类物种用解剖镜观察;所有物种均鉴定至尽可能低的分类单元^[10-12],并计数。

1.4 底栖动物群落生境状况调查

野外采样现场定性描述并记录采样点的底质类型和水生植被状况等。定量分析水质状况:水质样品与底栖动物样品同步采集,水质指标包括pH值、溶解氧(DO)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)。水质样品采集与分析参照《水和废水监测分析方法》(第四版),其中pH值和DO在采样现场测定并记录,TP和COD带回实验室分析。

1.5 数据处理

计算底栖动物群落Shannon-Wiener多样性指数,并用指数分级评价标准进行评价(见表1)。Shannon-Wiener生物多样性指数计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{n} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{n} \right) \quad (1)$$

式中: s 为样品中的种类数; n_i 为样品中第 i 种生物的个体数; n 为样品中生物总个体数。

对23个采样点的底栖动物群落结构进行聚类分析,对各聚类组的差异性做ANOSIM(one-way analysis of similarities)检验,对各聚类组底栖动物特征物种作SIMPER分析。利用PRIMER 6.0软件完成上述数据计算和分析。

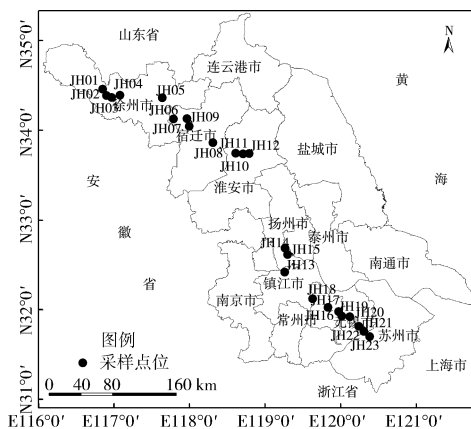


图1 京杭运河江苏段底栖动物群落结构调查点位布设

Fig. 1 Sampling sites of macrobenthic communities in Jiangsu Segment of Grand Canal

表1 Shannon-Wiener指数分级评价标准

Table 1 The evaluation standard of Shannon-Wiener index

指数范围	级别	评价状态
$H' > 3$	丰富	物种种类丰富,个体分布均匀
$2 < H' \leq 3$	较丰富	物种丰富度较高,个体分布比较均匀
$1 < H' \leq 2$	一般	物种丰富度较低,个体分布比较均匀
$0 < H' \leq 1$	贫乏	物种丰富度低,个体分布不均匀
$H' = 0$	极贫乏	物种单一,多样性基本丧失

2 结果与讨论

2.1 底栖动物物种组成

2018年5月京杭大运河江苏段23个采样点共采集到底栖动物42种(见表2)。其中,甲壳纲4

表 2 京杭运河江苏段底栖动物物种名录
Table 2 The list of macrobenthic species in Jiangsu Segment of Grand Canal

纲类别	种名称	出现频率 /%	纲类别	种名称	出现频率 /%
(Crustacea)	中华米虾 (<i>Caridina denticulata</i>)	4.3	(Oligochaeta)	丽蚌属某种 (<i>Lamprotula</i> sp.)	4.3
	中华小长臂虾 (<i>Palaemonetes sinensis</i>)	4.3		螺狮 (<i>Margarya melanioides</i>)	4.3
	钩虾属某种 1 (<i>Gammarus</i> sp. 1)	4.3		黑龙江短沟蜷 (<i>Semisulcospira amurensis</i>)	4.3
	钩虾属某种 2 (<i>Gammarus</i> sp. 2)	8.7		寡毛纲 霍甫水丝蚓 (<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>)	65.2
	蛭纲 宁静泽蛭 (<i>Helobdella stagnalis</i>)	4.3		苏氏尾鳃蚓 (<i>Branchiura sowerbyi</i>)	47.8
(Hirudinea)	医蛭 (<i>Hirudo</i> sp.)	4.3	克拉泊水丝蚓 (<i>Limnodrilus claparedianus</i>)	34.8	
(Polychaeta)	齿吻沙蚕 (<i>Nephtys</i> sp.)	8.7	豹行仙女虫 (<i>Nais pardalis</i>)	21.7	
	日本沙蚕 (<i>Nereis japonica</i>)	4.3	巨毛水丝蚓 (<i>Limnodrilus grandisetosus</i>)	21.7	
(Mollusca)	大脐圆扁螺 (<i>Hipppeutis umbilicalis</i>)	4.3	普通仙女虫 (<i>Nais communis</i>)	8.7	
	淡水壳菜 (<i>Limnopema lacustris</i>)	21.7	奥特开水丝蚓 (<i>Lumbriculus udekemianus</i>)	4.3	
	背瘤丽蚌 (<i>Lamprotula leai</i>)	2.3	参差仙女虫 (<i>Limnopema lacustris</i>)	4.3	
	耳萝卜螺 (<i>Radix</i> sp.)	4.3	中华颤蚓 (<i>Tubifex sinicus</i>)	4.3	
	方格短沟蜷 (<i>Semisulcospira cancellata</i>)	17.4	尖头杆吻虫 (<i>Stylaria fossularis</i>)	4.3	
	河蚬 (<i>Corbicula fluminea</i>)	30.4	头鳃虫属某种 (<i>Branchiodrilus</i> sp.)	4.3	
	蚌形无齿蚌 (<i>Anodonta arcaeformis</i>)	4.3	单孔蚓属某种 (<i>Monopylephorus</i> sp.)	8.7	
	中国淡水蛭 (<i>Novaculina chinensis</i>)	4.3	透清毛腹虫 (<i>Chaetogaster diaphanus</i>)	4.3	
	中国圆田螺 (<i>Cipangopaludina chinensis</i>)	4.3	管水蚓属某种 (<i>Aulodrilus</i> sp.)	4.3	
	梨形环棱螺 (<i>Bellamyia purificata</i>)	39.1	摇蚊类 羽摇蚊 (<i>Chironomus plumosus</i>)	8.7	
	铜锈环棱螺 (<i>Bellamyia acruginmosa</i>)	26.1	(Chironomidae) 摇蚊属某种 (<i>Chironomus</i> sp.)	13.0	
	狭萝卜螺 (<i>Radix lagotis</i>)	4.3	花纹前突摇蚊 (<i>Procladius choreus</i>)	4.3	
	圆顶珠蚌 (<i>Unio douglasiae</i>)	4.3	环足摇蚊属的某种 (<i>Cricotopus</i> sp.)	4.3	

种、多毛纲 2 种、蛭纲 2 种、软体动物 16 种、寡毛纲 14 种、昆虫纲 4 种(均为摇蚊类);优势种为寡毛纲的霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*), 优势度为 51.7%。

2.2 底栖动物多参数分析

基于 23 个采样点底栖动物种群密度的 Bray-Curtis 相似性系数的聚类分析见图 2。由图 2 可见,京杭运河江苏段 23 个采样点分成 4 组。其中,组 1 包括 JH01—JH05 5 个采样点,分布于徐州段,属于淮河流域;组 2 包括 JH06—JH13 8 个采样点,分布于宿迁、淮安、扬州段,属于淮河流域;组 3 包括 JH14—JH15 2 个采样点,分布于扬州、镇江段,属于长江流域;组 4 包括 JH16—JH23 8 个采样点,分布于常州、无锡、苏州段,属于太湖流域。

根据单边 ANOSIM 分析得出 4 个组底栖动物群落结构间有显著差异 (r 为 0.939 ~ 1.000, $p < 0.05$)。根据 SIMPER 分析,组 1 主要特征物种为克拉泊水丝蚓 (*Limnodrilus claparedianus*)、梨形环棱螺 (*Bellamyia purificata*)、豹行仙女虫 (*Nais pardalis*)、巨毛水丝蚓 (*Limnodrilus grandisetosus*)、霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*), 多样性均值为 2.52, 处于物种较丰富状态;组 2 主要特征物种

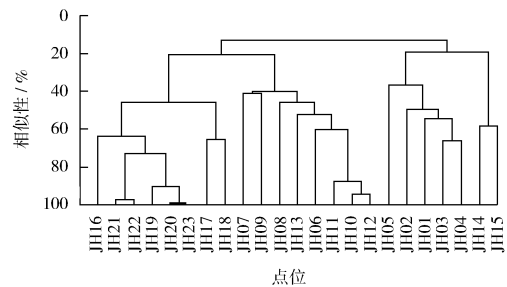


图 2 基于 23 个采样点底栖动物种群密度的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of Bray-Curtis similarity coefficient based on macrobenthic communities in 23 sampling sites

为河蚬 (*Corbicula fluminea*)、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*)、霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、铜锈环棱螺 (*Bellamyia acruginmosa*)、淡水壳菜 (*Limnopema lacustris*), 多样性均值为 2.05, 处于物种较丰富状态;组 3 主要特征物种为梨形环棱螺 (*Bellamyia purificata*), 多样性均值为 0.61, 处于物种贫乏状态;组 4 主要特征物种为霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*), 多样性均值为 0.64, 处于物种贫乏状态。

2.3 底栖动物群落生境状况和水质状况

根据采样点生境状况现场记录结果分析,4个组采样点水生植被和底质类型状况定性描述如表

3所示;4个组采样点的水质状况见表3。另外,京杭运河作为航道采样点多为货运码头,船舶较多。

表3 京杭运河江苏段各采样组生境和水质状况

Table 3 Water quality and habitat situation of sampling groups in Jiangsu Segment of Grand Canal

组别(采样点)	生境状况		水质指标			
	水生植被	底质类型	pH 值 平均值	DO 平均值 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	TP 平均值 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD 平均值 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
组1(JH01—JH05)	水草丰富	泥状含砂	8.31	8.78	0.123	17.0
组2(JH06—JH13)	水草较丰富	JH06—JH09 泥砂、JH10—JH11 硬质底泥	7.85	6.97	0.114	16.9
组3(JH14—JH15)	水草较少	坚硬底质	7.57	6.60	0.060	9.1
组4(JH16—JH23)	无水草	淤泥	7.20	5.14	0.246	29.0

2.4 不同河段底栖动物群落特征对生境的响应

不同河段底栖动物群落结构特征也不完全相同。相关研究^[8,13]认为,决定底栖动物多样性的关键因素是其生境状况的复杂性,其中底质是影响底栖动物分布的重要因素^[14],水生植被能衰减光强,减缓流速,与悬浮物含量成负相关,导致滤食者(如寡毛类)丰度随着水生植被尤其是沉水植物复杂度的增加而减少^[15]。有研究^[16]表明,在淤泥底质中物种数和密度比卵石、砾石底质要小,寡毛纲则多出现在淤泥底质中。与前人研究^[16]结果一致,组1徐州段处于京杭运河江苏段上游,水草丰富,底质为泥砂,生境较为复杂,能为底栖动物提供较为良好的生存环境;徐州段底栖动物密度最高;底栖动物物种最多,覆盖种类最广,包括甲壳纲、多毛纲、软体动物、寡毛纲和水生昆虫;底栖动物群落多样性最高。组2宿迁、淮安段底栖动物密度相对较高,底栖动物物种数和多样性均仅次于组1,水草丰富、底质多为泥砂,可宿迁段 JH09、淮安段 JH10 均为船舶码头,船舶搅动不利于底栖动物生存^[17],特别是依赖水草生长的甲壳动物^[18]。组3底栖动物群落密度最低,该组处于长江流域,受长江河流影响无法为底栖动物提供一个良好的生存环境,故底栖动物群落多样性也最低,其中镇江段采样点 JH15 仅采集到梨形环棱螺(*B. purificata*)。组4处于京杭运河江苏段下游苏南段,该组生境单一,底质为淤泥,底栖动物群落优势种属于寡毛纲。张皓等^[6]报道了京杭运河常州段 JH16 测点底栖动物物种单一,王亚超等^[7]报道了京杭运河苏州段生物多样性指数多处于贫乏状况。

一般来说,水体营养缺乏或者营养极端丰富都不利于物种的生存,其结构往往简单,多样性低^[19-20]。根据《地表水环境质量标准》(GB

3838—2002),组1和组2水体中TP和COD达到Ⅲ类水质,适宜水生生物的生长繁殖。组3水质营养缺乏,不适合水生生物生长。而组4水体有机污染严重^[21-22],过量有机物的分解消耗大量的DO,从而导致耐缺氧物种霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*)大量繁殖^[23-24]。

3 结论

(1) 京杭运河江苏段底栖动物物种多样性处于一般状态,物种丰富度较低。

(2) 京杭运河江苏段底栖动物群落空间分布特征表现为徐州段水草丰富,底栖动物多样性最高,物种处于较丰富状态;宿迁和淮安段水草较丰富,底栖动物多样性较高,物种处于较丰富状态;扬州和镇江段地处长江流域,水草较少,底质坚硬,底栖动物多样性最低,物种单一;下游常州、无锡和苏州段处于太湖流域,无水草,底质多为淤泥,底栖动物多样性较低,物种单一。

(3) 水生生境状况是影响京杭运河江苏段底栖动物群落结构的重要因素,为了合理利用水资源和保护生物多样性,亟须加强水生生态系统修复。

[参考文献]

- [1] BECK M W, HATCH L K. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity [J]. Environmental Reviews, 2009, 17, 21 - 44.
- [2] MARZIN A, ARCHAIMBAULT V, BELLIARD J, et al. Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? [J]. Ecological Indicators, 2012, 23: 56 - 65.
- [3] DAUER D M. Biological criteria, environmental health and estuarine macrobenthic community structure [J]. Marine Pollution Bulletin, 1993, 26(5): 249 - 257.

- [4] CHAINHO P, COSTA J L, CHAVES M L, et al. Seasonal and spatial patterns of distribution of subtidal benthic invertebrate communities in the Mondego River, Portugal—A poikilohaline estuary [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 555: 59–74.
- [5] 李勇, 潘立勇. 利用底栖动物研究京杭运河徐州段的水质变化 [J]. *污染防治技术*, 2005, 18(4): 12–13, 37.
- [6] 张皓, 徐东炯, 张翔, 等. 京杭运河常州老运河段底栖动物多样性研究 [J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(4): 22–28.
- [7] 王亚超, 徐恒省, 李继影, 等. 京杭运河苏州市区段大型底栖动物种群结构特征与评价 [J]. *中国环境监测*, 2013, 29(3): 79–83.
- [8] 李娣, 牛志春, 王霞, 等. 长江江苏段底栖动物群落结构与多样性分析 [J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(1): 96–100.
- [9] CAI Y J, GONG Z J, QIN B Q. Benthic macroinvertebrate community structure in Laek Taihu, China: Effects of trophic status, wind-induced disturbance and habitat complexity [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38(1): 39–48.
- [10] 董聿茂, 诸葛阳, 黄美华, 等. 浙江动物志 软体动物 [M]. 浙江: 浙江科学技术出版社, 1991.
- [11] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 90–98, 476–480.
- [12] 陈义. 中国动物志: 环节动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [13] SHOSTELL J M, WILLIAMS B S. Habitat complexity as a determinant of benthic macroinvertebrate community structure in cypress tree reservoirs [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 575: 389–399.
- [14] 陈博, 李卫明, 陈求稳, 等. 夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(7): 1758–1765.
- [15] RENNIE M D, JACKSON L J. The influence of habitat complexity on littoral invertebrate distributions: patterns differ in shallow prairie lakes with and without fish [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(9): 2088–2099.
- [16] COUCEIRO S R M, HAMADA N, FORSBERG B R, et al. Effects of anthropogenic silt on aquatic macroinvertebrates and abiotic variables in streams in the Brazilian Amazon [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(1): 89–103.
- [17] 陈凯, 张宗祥, 刘朔孺, 等. 溱湖国家湿地公园水环境特征及底栖动物群落结构研究 [J]. *湿地科学*, 2011, 9(1): 26–32.
- [18] MAGOBA R N, SAMWAYS M J. Recovery of benthic macroinvertebrate and adult dragonfly assemblages in response to large scale removal of riparian invasive alien trees [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2010, 14(6): 627–636.
- [19] FROUIN P. Effects of anthropogenic disturbances of tropical soft-bottom benthic communities [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 194: 39–53.
- [20] 许静波, 徐明, 刘军, 等. 射阳湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子相关性研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(2): 27–31.
- [21] 陆家骝, 卢仁杰, 吕清, 等. 京杭运河苏州段重点监控污染源调查分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2016, 28(3): 29–32.
- [22] 卢仁杰, 张晓婕, 朱燕玲, 等. 苏州市重点监控行业 VOCs 产生和排放特征调查与分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(2): 68–71.
- [23] 周笑白, 张宁红, 张咏, 等. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探 [J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 271–278.
- [24] LI D, WU N C, TANG S, et al. Factors associated with blooms of cyanobacteria in a large shallow lake, China [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2018, 30: 1–15.

(上接第17页)

- [9] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近10年中国16个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(2): 201–208.
- [10] 黄观, 刘志红, 刘伟, 等. 北疆地区气溶胶光学厚度的时空特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(3): 286–292.
- [11] 杨琨, 孙照渤, 倪东鸿. 1999—2003年我国气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1): 92–96.
- [12] 毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS5 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究 [J]. *气象学报*, 2001, 59(3): 352–359.
- [13] 胡蝶. 中国地区大气气溶胶光学厚度的卫星遥感监测分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [14] 王钊, 彭艳, 车慧正, 等. 近10年关中盆地 MODIS 气溶胶的时空变化特征 [J]. *高原气象*, 2013, 32(1): 234–242.
- [15] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, 等. 惠州城市植被的滞尘效应 [J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2455–2462.
- [16] PRUSTY B A K, MISHRA P C, AZEEZ P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60: 228–235.
- [17] 张云, 肖钟湧. 云南省气溶胶光学厚度时空变化特征的遥感研究 [J]. *中国环境监测*, 2016, 32(2): 127–133.
- [18] 高飞, 李铜基. 气溶胶光学厚度的时空变化特征 [J]. *海洋技术*, 2003, 22(3): 15–19.
- [19] 许潇锋, 邱金桓, 牛生杰, 等. 近45年中国12个一级站大气气溶胶光学厚度变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 488–495.
- [20] 关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 185–191.
- [21] 张宸赫, 赵天良, 王富, 等. 2003—2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 [J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 476–484.
- [22] 卢晔, 何豫秦, 庞翻, 等. 华东地区风速趋势变化特征及其原因分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015(13): 231–234.
- [23] 马奋华, 管兆勇. 中国东部地区冬季 AOD 分布特征及与冬季风环流的可能联系 [J]. *大气科学学报*, 2019, 42(2): 255–266.