◆健康保育与环境修复◆

典型北方城市水生态系统健康评价及时空演变特征

郭锐利[1]，肖　静[1]，霍瑞娜[1]，李　伟[2]

（1. 濮阳市生态环境监测和安全中心，河南 濮阳　457000；2. 河南省濮阳生态环境监测中心，河南 濮阳　457000）

［摘　要］北方地区多为缺水性城市，城市水生态系统健康水平相对较低。为推动城市文明健康发展，探索水生态建设工作重点，以水动力、水管理、服务功能三大领域层面构建城市水生态系统健康综合评价指标体系，运用熵值确权综合评价法对濮阳市2013—2022年各指标进行权重确定和综合评价分析。结果表明：建成区供水管道密度、财政收入占生产总值的比例、万元GDP用水量3项指标权重最大；城市水生态系统健康水平呈逐年升高趋势，2021年评价指数最高；水动力评价值逐步提升，水管理水平相对稳定，服务功能中生态环境质量波动性较大；濮阳市作为北方典型的缺水性城市，水动力是影响城市水生态系统健康水平的主要因素，政府需要加大本地地表水、地下水、再生水等水资源的合理配置以及氮、磷等污染水体的生态治理，以保证城市水生态系统的健康发展。

［关键词］城市水生态系统健康；熵值法；水动力；濮阳市

［中图分类号］X171.1　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）07-0071-05

Health assessment and spatial-temporal evolution of water ecosystem in typical northern city

GUO Ruili[1], XIAO Jing[1], HUO Ruina[1], LI Wei[2]

(1. *Eco-environment Monitoring and Safety Center of Puyang City, Puyang* 457000, *China*;
2. *Puyang Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Puyang* 457000, *China*)

Abstract: Most of the northern regions are water-scarce cities, and the health level of urban water ecosystem is relatively low. In order to promote the healthy development of urban civilization and explore the priorities of water ecological construction, the comprehensive evaluation index system of urban water ecosystem health is constructed from the three aspects of water power, water management and service function. The weight determination and comprehensive evaluation analysis of data indicators of Puyang city from 2013 to 2022 are carried out with the entropy-weighted comprehensive evaluation method. The results show that: The density of water supply pipeline in built-up areas, the proportion of fiscal revenue to gross domestic product, and the water consumption per 10 000 RMB Yuan of GDP are the three indicators with the greatest weight. The health level of urban water ecosystem in Puyang city shows an increasing trend year by year, and the highest evaluation index is in 2021. The hydrodynamic evaluation value is gradually increased, the water management level is relatively stable, and the ecological environment quality of the service function fluctuates greatly. As a typical city with water shortage in northern China, water power is the main factor affecting the health level of urban water ecosystem in Puyang city. The government needs to increase the reasonable allocation of local surface water, groundwater, reclaimed water and other water resources, as well as the ecological treatment of nitrogen, phosphorus and other polluted water, so as to ensure the healthy development of urban water ecosystem.

Key words: urban water ecosystem health; entropy method; hydrodynamic force; Puyang city

水是人类社会赖以生存和发展的物质基础，城市的发展在很大程度上受制于水生态环境质量的影响。随着习近平生态文明思想的提出，城市水生态建设构成了现代城市发展的重要内容，城市水生态系统健康状况评价也成为研究热点[1-2]。城市水生态系统是以人工为主的自然-人工复合系统，是在城市空间范围各种环境要素和人类社会活动之间以水为中心的复杂系统。国外城市生态系统和流域生态系统健康评价研究开展较早，但城市水生态系统研究多集中在城市水利工程、水务控制规划及河流

［收稿日期］2024-06-17

［作者简介］郭锐利(1984-)，女，河南濮阳人，高级工程师，研究方向为生态学。E-mail：guoruilim@163.com

［基金项目］河南省软科学项目(222400410469)

湿地建设等方面[3-5]。国内学者早期提出了水安全、水环境、水景观、水经济、水文化五位一体的城市水生态建设模式[6]，为我国生态城市建设和规划提供了重要理论依据。随后，部分学者从水生态文明建设角度对城市水生态系统健康进行研究和分析，认为城市水生态系统健康体现在水生态系统组织结构良好、具有一定活力和恢复力、人群健康、服务功能健全等方面，并以水和人文两个系统为基础构建了城市水生态系统健康指标体系[7-8]。近年来，少数学者以大数据为基础，从水资源、海绵城市、黑臭水体治理、供水安全等方面构建城市水生态系统健康评价指标体系[9]。

城市水生态系统健康评价原则要求依据城市所处地理位置、气候特征以及社会经济发展要素等建立与之相适应的评价指标。我国北方地区降水量少，蒸发量大，水资源贫乏，城市发展过程中的水资源供需矛盾突出[10]；通常人口居住和产业发展较为集中，致使水资源开发强度较高，城市河流水体受污染量较大，环境容量偏低。北方城市水生态系统健康评价指标体系中应综合考虑水资源状况、城市水体流通载体、管理与服务等多种因素。然而，以往城市水生态系统健康评价研究在评价指标体系构建中较少考虑城市差异化特征，致使对北方典型城市水生态系统健康状况及时空演变特征缺乏足够认知。基于此，以水动力、水管理、服务功能为属性层，建立典型北方城市水生态系统健康综合评价指标体系，选取濮阳市为研究对象，应用熵权综合评价法进行指标权重的确定和综合评价，为北方城市水生态系统管理提供科学支撑与实践基础[11]。

1　区域概况

濮阳市位于河南省东北部，地处冀、鲁、豫 3 省交界处，位于中纬地带，属黄河冲积平原，境内河流 150 余条，分属黄河、海河两大流域，是全国重要的商品粮基地之一。濮阳市属于极度缺水城市，据 2023 年濮阳市水利局数据显示，濮阳市人均水资源是全省人均水资源的 1/3、全国的 1/16。这种情形一方面与区位条件有关，另一方面也与城市发展中用水、治水的策略和实践紧密相连。此外，伴随城市化进程加快，生活和工业用水急剧增加，致使氮、磷等物质大量排放，严重影响河流水质，也对研究区水生生态系统的健康和稳定构成威胁。因此，聚焦濮阳市开展城市水生态系统健康评价，将为识别和量化北方城市水资源问题和风险提供参考，从而为制定有效的水资源管理和保护策略提供科学依据。

2　研究方法

2.1　指标体系

北方城市大部分为缺水性城市，科技管理水平相对东南沿海城市较为落后，城市河流水体多为排涝纳污功能，城市水生态系统服务功能较弱。因此选择水动力、水管理、服务功能三大领域层作为城市水生态系统健康评价指标体系的基础框架，选取水资源状况、组织结构、用水水平、科技管理水平、生态环境质量、社会经济发展水平 6 项组成要素 18 项具体指标构建城市水生态系统健康综合评价指标体系，详细指标体系见表 1。

表 1　濮阳市城市水生态系统健康评价指标体系及权重（2013—2022 年）

领域层	要素	具体指标	单位	指标说明	信息熵值	指标权重
水动力	水资源状况	水资源总量	万 m^3	正向	0.990 7	0.050 0
		产水模数	万 m^3/km^2	正向	0.990 6	0.050 1
		人均水资源量	m^3	正向	0.991 0	0.048 1
	组织结构	建成区供水管道密度	km/km^2	正向	0.985 1	0.080 1
		建成区排水管道密度	km/km^2	正向	0.985 9	0.075 8
		生态环境补水	亿 m^3	正向	0.985 8	0.076 4
水管理	用水水平	人均用水量	m^3	正向	0.992 8	0.038 7
		万元GDP用水量	m^3	逆向	0.985 2	0.079 2
		农田灌溉 667 m^2平均用水量	m^3	逆向	0.993 3	0.035 7
	科技管理水平	污水处理率	%	正向	0.992 5	0.040 0
		万元工业增加值用水量	m^3	逆向	0.992 5	0.040 1
		耗水率	%	逆向	0.990 3	0.051 8
服务功能	生态环境质量	建成区绿化覆盖率	%	正向	0.993 2	0.036 5
		地表水断面好水比例	%	正向	0.991 8	0.044 2
		人均公园绿地面积	m^2	正向	0.992 4	0.040 5
	社会经济发展水平	财政收入占生产总值的比例	%	正向	0.984 7	0.082 2
		城镇居民恩格尔系数		逆向	0.987 4	0.067 4
		每千人拥有医院、卫生院床位	张	正向	0.988 2	0.063 2

2.2　确权与评价方法

评价的基础和前提是构建评价模型，确定合理、科学的评价方法，城市水生态系统健康评价常用的评价方法有熵权综合评价、模糊物元、层次分析、主成分分析、能值计算、突变级数等[12-17]，其中熵权综合评价法确定指标权重可信度较高。熵权综合评价法比较适合多属性、多层次、多目标指标体系的评价。熵是一个重要的物理学概念，在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量，信息熵越大，信息的无序度越高，其信息的效用值越小；反之，信息熵越小，信息的无序度越低，其信息的效用值越大[18-19]。

（1）对某个城市 m 年城市水生态系统健康状况 n 个指标构建初始判断矩阵 X。

$$X=\{X_{ij}\},(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)。\tag{1}$$

（2）采用 Min-Max 归一化法对原始数据进行标准化处理，消除各指标的量纲差异。

正向指标标准化：$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{ij\min}}{X_{ij\max}-X_{ij\min}}。\tag{2}$$

逆向指标标准化：$$X'_{ij}=\frac{X_{ij\max}-X_{ij}}{X_{ij\max}-X_{ij\min}}。\tag{3}$$

（3）各指标比重计算公式：

$$P_{ij}=\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X'_{ij}}。\tag{4}$$

（4）第 j 项指标的熵值：

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij}。\tag{5}$$

（5）第 j 项指标的差异系数：

$$Z_j=1-e_j。\tag{6}$$

（6）第 j 项指标的权重：

$$d_j=\frac{Z_j}{\sum_{j=1}^{n}Z_j}。\tag{7}$$

（7）综合评价值：

$$W_j=\sum_{j=1}^{n}d_j\,x'_{ij}。\tag{8}$$

3　实证分析

3.1　数据来源与指标权重

本研究以濮阳市水生态系统健康状况为评价对象，数据来源主要为 2013—2022 年濮阳市统计年鉴、历年濮阳市水资源公报、濮阳市生态环境质量报告等[20]，构建濮阳市 2013—2022 年城市水生态系统健康评价指标体系，运用熵权综合评价法计算得出指标权重 d_j，具体结果如表 1 所示。

3.2　权重分析

根据表 1 各指标权重结果，18 个具体指标中，财政收入占生产总值的比例、建成区供水管道密度、万元 GDP 用水量这 3 项指标信息熵值较小，说明该指标信息效用值最大，权重赋值较大。农田灌溉 667 m^2 平均用水量、建成区绿化覆盖率、人均用水量 3 项指标信息熵值最大，信息效用值最小，权重赋值较大。累加得出各要素所占权重比例，其中组织结构比重最大，其次社会经济发展水平、用水水平、水资源状况、科技管理水平、生态环境质量。在典型北方城市水生态系统健康评价中，组织结构和社会经济发展水平 2 项要素影响较大，具体情况如图 1 所示。

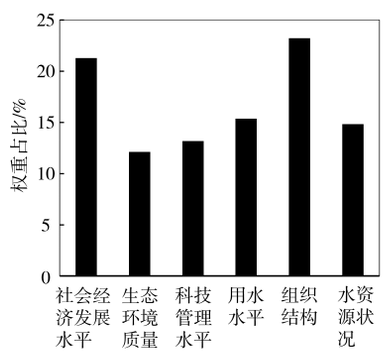


图 1　濮阳市城市水生态系统健康评价指标各要素权重占比

3.3　城市水生态系统健康状况时空演变特征分析

对 2013—2022 年濮阳市城市水生态系统健康状况进行综合评价，具体情况见图 2。结果显示，濮阳市城市水生态系统健康状况总体呈波动上升趋势，2021 年综合评价指数最高，2017 年和 2019 年是城市水生态系统健康水平提升的关键节点。服务功能在 2013—2019 年这一时段与综合评价曲线变化一致，2020—2022 年则呈下降趋势；水动力总体呈平稳上升，2021 年出现峰值，2022 年有所下降；水管理则在 2014 年有较大幅度上升，此后平稳上升。

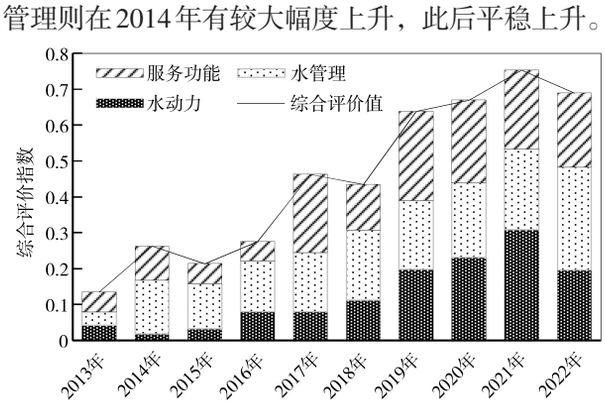


图 2　2013—2022 年濮阳市城市水生态系统健康状况综合评价情况

从时空演变特征分析，濮阳市水动力评价值逐步提升，结合原始数据发现，近几年水资源总量明显提升，降雨量明显增多，尤其是 2021 年出现降

水特丰年，拉高了水动力指数的总体评价值，建成区供、排水管道密度等指标也随基础设施不断完善而逐步提升；水管理水平相对较为稳定，用水水平和科技管理水平自2017年以来无明显差异化；服务功能自2019年以后明显提升并趋于稳定，其中社会经济水平2019年最高，可能受2020—2022年疫情影响，社会经济发展水平略有下滑。

3.4 城市水生态系统氮、磷排放特征分析

根据《黄河流域“一市一策”驻点科技帮扶研究驻点城市水污染源排放清单编制技术指南》排污系数和濮阳市环统数据，2022年濮阳市废水氨氮、总氮、总磷排放量分别为3 779、8 709、709 t；其中，生活源的氨氮排放量最大，占比92%；生活源和农业源的总氮排放量较大，占比分别为58%和25%；生活源和农业源总磷排放量较大，占比分别为59%和37%。根据2022年濮阳市生态环境质量报告书，53个地表水断面中，总磷超标的断面31个，超标占比58.5%；氨氮超标的断面22个，超标占比41.5%。具体情况见表2。

表2　2022年濮阳市地表水断面超标情况

指标	超标个数	占比/%	指标	超标个数	占比/%
总磷	31	58.5	石油类	10	18.9
化学需氧量	29	54.7	氟化物	5	9.4
5 d生化需氧量	25	47.2	阴离子表面活性剂	3	5.7
氨氮	22	41.5	挥发酚	2	3.8
高锰酸指数	21	39.6	硫化物	1	1.9

生活源与农业源氮、磷排放是制约濮阳市水生态健康状况的重要因素之一。因此，加强水体氮、磷治理是改善城市水环境质量、促进城市可持续发展的必要措施。以往多采取源头和过程控制等措施，并结合物理、化学和生物学方法，进行生活污水和农业氮、磷污染的防控和治理[21-23]。在生态产业化社会发展需求背景下，水体氮、磷的资源化利用和产业化研究是解决水资源短缺和改善水环境质量的重要途径。例如，基于物质流分析方法，建立工业共生和元素的代谢回路，将极大推动水体氮、磷的资源化利用实践[24]；此外，通过构建固形废物收集系统，将水体氮、磷元素转化为可再利用的资源，应用于农业、园艺等领域，作为土壤改良剂或植物生长的养分来源[25]。结合濮阳市氮、磷排放规律与区位特点，未来可开展以氮、磷靶向循环利用为目标的水体生态修复技术试点建设，通过对生活源和农业源污水集中收集和预处理，去除有害物质，保留氮、磷等营养元素；再通过物理、化学、生物技术集成与联合应用，实现水体氮、磷的吸收、转化利用；最终，形成污水–生物产量–水质净化的产业链，实现氮、磷污染物资源化利用和生态修复的双重目标。

4 结论

本文结合北方城市特点，选择水动力、水管理、服务功能三大领域层作为城市水生态系统健康评价指标体系的基础框架，同时运用客观性较强的熵值法对指标赋权后对濮阳市不同年份的城市水生态系统健康状况进行综合评价。得到如下结论：

（1）濮阳市2013—2022年城市水生态系统健康水平呈逐年升高趋势；从时空演变特征分析，水动力评价值逐步提升，水管理水平相对较为稳定，服务功能中生态环境质量波动性较大。

（2）水动力是影响城市水生态系统健康整体水平和城市发展的关键因素。未来地方政府应重视水资源状况这一要素指标，加强水资源总量、产水规模、人均资源量等具体指标提升方面的工作，加大提升生态环境补水量，满足城市河流的生态流量补给。

（3）生活源和农业源氮、磷排放是影响濮阳市水生态系统质量的两个重要途径。结合濮阳市生活源和农业源氮、磷排放特点，开展以氮、磷靶向循环利用为目标的水体生态修复技术建设，将有助于实现水体氮、磷污染物资源化利用和生态修复的双重目标。

[参考文献]

[1] ELLWANGER J H, BYRN E L B, CHIES J A B. Examining the paradox of urban disease ecology by linking the perspectives of Urban One Health and Ecology with Cities[J]. Urban Ecosystems, 2022, 25(6): 11.

[2] SHAH A M, LIU G Y, CHEN Y, et al. Urban constructed wetlands: Assessing ecosystem services and disservices for safe, resilient, and sustainable cities[J]. Frontiers of Engineering Management, 2023, 10(4): 582-596.

[3] SCHMITT T G. Integrated storm water management in urban areas [J]. European Water Pollution Control, 1996, 6(3): 14-20.

[4] ELLIS J B. Risk assessment approaches for ecosystem responses to transient pollution events in urban receiving waters [J]. Chemosphere, 2000, 41(1-2): 85-91.

[5] JOHANNES L, KARIN F, HORST S. Life cycle analysis and soil organic carbon balance as methods for assessing the ecological sustainability of ind generation biofuel feedstock[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 5(3): 95-105.

[6] 王沛芳，王超，冯骞，等.城市水生态系统建设模式研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2003，31(5)：485-489.

[7] 左其亭.水生态文明城市建设应优先满足水生态系统健康要求[N].黄河报，2016-05-07(001).

[8] 宋梦林，左其亭.基于水生态文明理念的城市水生态系统健康分析[C]//中国自然资源学会水资源专业委员会.水科学前沿与

中国水问题对策——第十三届中国水论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2015:287-295.
[9] 张志果,陶相婉,梁涛,等.城市水生态系统构建策略与评估指标体系初探[J].城市建筑,2018,6(17):57-58.
[10] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等.关于中国北方水资源问题的再认识[J].水科学进展,2013,24(3):303-310.
[11] 王超,王沛芳,冯寨,等.城市水生态系统建设与管理[M].北京:科学出版社,2004.
[12] YANG G, YANG X, REN N. Characterizing the water resource-environment-ecology system harmony in Chinese cities using integrated datasets [J]. The Science of the Total Environment,2024,921:171094.
[13] HAN H, LI H M, ZHANG K Z. Urban Water Ecosystem Health Evaluation Based on the Improved Fuzzy Matter-Element Extension Assessment model: case study from zhengzhou city, China [J]. Mathematical Problems in Engineering,2019,2019:7502342.
[14] YANG Q, LIN A W, ZHAO Z Z, et al. Assessment of Urban Ecosystem Health Based on Entropy Weight Extension Decision Model in Urban Agglomeration[J]. Sustainability,2016,8(9):869.
[15] 陈东升,赵丽宾.基于AHP-MF模型的城市生态系统健康评价[J].河南大学学报,2005,35(3):111-114.
[16] 郭锐利,郑钦玉,刘娟,等.基于熵值法和GM(1,1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J].中国环境科学,2012(6):1148-1152.
[17] 魏婷,朱晓东,李扬帆.基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价[J].生态学报,2008,28(12):6312-6320.
[18] 向柳.基于熵权与模糊数学的城市生态系统健康评价[J].绿色科技,2015(9):1-5.
[19] 邱菀华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2002.
[20] 濮阳市统计局.濮阳市2023年统计年鉴[EB/OL].(2024-05-17)[2024-06-17].http://pystj.puyang.gov.cn/show.asp?id=2586.
[21] 马仕先.典型平原河网地区流域面源氮磷污染源效应模拟与污染负荷研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
[22] 王芳,张昊,贺婧,等.生物磷肥在农业上的推广应用研究[J].磷肥与复肥,2024,39(3):16-20.
[23] 寇长林,骆晓声.河南省农田面源污染发生规律及防控研究[J].磷肥与复肥,2020,35(8):27-29.
[24] 武娟妮.工业园区碳、氮、磷代谢分析——以宜兴经济开发区为例[D].北京:清华大学,2010.
[25] 张家赫,许世玲,左妍,等.工程化循环水养殖池塘的氮磷收支研究[J].水生生物学报,2024,48(5):734-740.

(上接第51页)

表4　凹凸棒土不同添加量下油枯型有机无机复合肥堆密度

凹凸棒土添加量/%	堆密度/(g·mL^{-1})	凹凸棒土添加量/%	堆密度/(g·mL^{-1})
0	0.592	0.6	0.589
0.1	0.583	0.7	0.584
0.2	0.589	0.8	0.582
0.3	0.583	0.9	0.578
0.4	0.591	1.0	0.577
0.5	0.629		

由表4可知，随着凹凸棒土添加量增加，肥料颗粒堆密度基本呈现先增加后降低的趋势，这与肥料颗粒的强度变化趋势一致。当凹凸棒土的添加量为0.5%时，肥料颗粒的堆密度达到最大，为0.629 g/mL，这表明添加量为0.5%时的肥料颗粒在装填打包时具有更明显的优势。比较其他处理条件下的肥料颗粒堆密度可发现，这些肥料颗粒堆密度的差异较小，说明凹凸棒土添加量过低或过高对肥料颗粒堆密度的影响较小。

3　结论

以不同用量的凹凸棒土作为油枯型有机无机复混肥的造粒剂，选择圆盘造粒机进行造粒，并测量肥料颗粒的颗粒强度、堆密度、崩解速率、成粒率，可得到以下结论：

（1）通过对肥料颗粒的成粒率进行计算可得出，在凹凸棒土添加量为0.5%时，颗粒的成粒率最大，成粒效果较好；

（2）通过对颗粒强度的测量可以得出，不使用凹凸棒土时，肥料颗粒具有一定的强度，当凹凸棒土添加量在0.5%时，圆盘造粒的颗粒强度最高，平均颗粒强度为8.35 N；

（3）通过对肥料在水中的溶解时间及崩解速率的测量可发现，凹凸棒土对油枯型有机无机复合肥颗粒的溶解时间、崩解速率影响不大，肥料颗粒的溶解时间均低于3 min，崩解速率也较快；

（4）通过对肥料颗粒的堆密度进行测量可得出，凹凸棒土对肥料颗粒的堆密度产生一定的影响，当凹凸棒土添加量为0.5%时，颗粒的堆密度达到最大，达到了0.629 g/mL。

[参考文献]

[1] 马玉恒,方卫民,马小杰.凹凸棒土研究与应用进展[J].材料导报,2006(9):43-46.
[2] 王萍,李国昌.凹凸棒石颗粒吸附剂制备及其性能[J].非金属矿,2005(5):21-24.
[3] 胡涛,钱运华,金叶玲,等.凹凸棒土的应用研究[J].中国矿业,2005(10):73-76.
[4] 赵美芝,邵宗臣,邓友军,等.有机粘土的特性及其对肥料养分的缓释作用[J].矿物学报,2001(2):189-195.
[5] 吴明山,王禄宝.有机无机复混肥的研制与生产[J].磷肥与复肥,1999,14(5):47.
[6] 陈荣平,李海涛.助剂对复混肥成球及其强度的影响[J].化学工业与工程技术,2001(5):12-13.
[7] 李彦明,李国学.有机复混肥造粒用有机粘结剂的研制及其造粒性能的研究[J].磷肥与复肥,2005,20(4):54-56.
[8] 佘文凯,苟剑渝,彭玉龙,等.秸秆有机无机复混肥适宜生产工艺参数研究[J].土壤通报,2019,50(5):1185-1190.
[9] 孙学军,叶进,兰银在,等.有机-无机复混肥圆盘造粒试验研究[J].中国农机化,2005(2):51-53.
[10] 王洪富,高进华,崔然,等.添加"松土精"的肥料颗粒强度影响因素探讨[J].磷肥与复肥,2018,33(11):7-8.
[11] 孙玉翠,王国栋,杨燕.崩解剂用于肥料的实验探究[J].云南化工,2018,45(6):109-111.