

景观规划中的格局-过程关系理论研究进展

汪晓菲 (深圳市万卉园景观工程有限公司, 广东深圳 518042)

摘要 格局与过程关系在景观规划中的理论有两种体系,一是关于景观原理的实质性理论,二是关于景观规划的理论的程序性理论。实质性理论研究演变中包括从“格局-过程-尺度”到“格局-过程-服务-可持续”再到“格局-过程-设计”3种理论范式。程序性理论研究发展中,包括从“经验”到“实证”再到“综合”和“试验”等4种理论范式。目前,景观规划中有关这方面的理论研究,还处在格局与过程“一对一”的基础上进行。一个景观是多个生态过程综合作用的影响的结果,研究一个景观格局中的多个生态过程相互影响是未来景观规划理论研究中更应关注的问题。

关键词 景观规划;格局;实质性理论;过程;程序性理论;范式

中图分类号 TU 983 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)14-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.14.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress of Pattern-Process Relationship Theory in Landscape Planning

WANG Xiao-fei (Shenzhen Wanhuiyuan Landscape Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518042)

Abstract There are two theories about the relationship between pattern and process in landscape planning, one is the substantive theory of landscape principle, the other is the procedural theory of landscape planning. The evolution of substantive theoretical research includes three theoretical paradigms from “pattern-process-scale” to “pattern-process-service-sustainability” and then to “pattern-process-design”. The development of procedural theory research includes four theoretical paradigms, from “experience” to “demonstration” to “synthesis” and “experiment”. At present, the theoretical research on this aspect in landscape planning is still carried out on the basis of pattern and process. A landscape is the result of the comprehensive effect of multiple ecological processes, and the study of the interaction of multiple ecological processes in a landscape pattern is a problem that should be paid more attention to in the theoretical research of future landscape planning.

Key words Landscape planning; Pattern; Substantive theory; Process; Procedural theory; Paradigm

在生态基础设施、人居生态环境、城镇化建设等中,规划就是预先科学规划这些建设进行的策略和途径及其尺度效应,使这些建设能达到预期目的,因此,在制定某种景观规划时都应有理论依据。从风景园林设计的研究进展可知,生态学科的基础理论贯穿在景观规划中。由于景观规划涵盖了地理学、美学、生态学等多种学科内涵,而且景观规划面临的可能是对不同的地理空间、不同文化习俗等的独特景观进行整体设计,具有其独特性。因此,虽然景观规划的基础理论主要来源于生态学科,但不等同于生态学科。笔者依据景观规划研究发展脉络,梳理景观规划的理论研究进展过程。这不仅使人能清晰了解景观规划中的理论形成的来源和去脉,而且有助于对景观空间格局与生态过程的关系的正确认知,对景观规划具有重要的实践意义。

1 景观规划的概念

景观规划是以景观为对象,在景观自然过程中如何协调人类活动与景观格局的关系进行人为预先安排。由于地理学、美学、生态学等多种学科内涵都渗透到景观含义中,导致不同学科对景观有不同的认识。Gobster 等^[1]提出的景观概念认为:景观是一个综合的社会-生态系统,这个系统具有可视性,而且时空维度是可变的,由此认为景观具有多功能和跨学科的属性。也有学者认为景观规划是一种前瞻性活动(创造、修复和加强景观的活动)^[2]。也有学者认为能回避风险、可提高资源的可持续利用及其有效性,能够很好地管理景观变化过程的预先安排就叫景观规划^[3]。还有把景观规

划理解为:景观规划是关于自然资源如何管理、土地如何利用、城镇景观空间变化格局、农业土地变化格局等多学科的综合科学^[4]。目前,能为大众理解和接受的景观规划的概念是:在土地利用中协调自然过程与人类活动的关系,在自然过程和人文社会的基础上,用一个相对宏观的尺度对景观的发展变化作人为的预先安排^[5]。

可见景观规划包含两个内容:①景观是一种自然“资源”;②规划是在自然景观与人类活动中,找到景观最佳的“使用”的方式。有研究者认为景观规划与生态规划或景观生态规划的概念是同义反复的,它们的基础理论大都来自生态学等自然科学,在规划时都强调空间格局变化与实践的重要性,以及如何控制人类的行为,保护和利用好自然资源,使人类社会系统与自然系统之间能相互协调共同发展^[6]。不过它们面对的自然系统内容有所不同,景观规划主要是如何处理景观(土地)与人类活动之间的关系,找到最佳的“景观(土地)使用”方式,生态规划更强调人类社会系统与自然系统之间能相互协调共同发展。

2 景观规划理论的体系

景观规划是一种科学性的规划,在制定规划方案时需要某种理论作为支撑。目前用于景观规划理论体系有两种,一种是程序性理论体系,另一种是实质性理论体系^[7-8]。人们对社会科学、自然科学和人文科学之间的关系研究中获得了“景观”的理论,使人们能利用这些理论进行景观规划,也就是说“景观的理论”属于景观规划实质性理论范畴。人们从景观生态学的基础理论出发,制定景观规划设计方案,使景观更好地为人类服务,又能使景观可持续发展,在这种研究

基金项目 国家林业公益性行业科研专项(201104009)。

作者简介 汪晓菲(1973—),男,四川苍溪人,博士,从事景观生态和景观工程研究。

收稿日期 2020-11-16

划,由此可知,“规划的理论”就是景观规划中程序性理论^[9]。

由于景观生态学是一门交叉科学,研究的是如何改善空间格局与生态过程的关系,如何协调自然系统和社会系统之间相互平衡。因此,格局与过程关系原理是景观规划应遵循的基本准则,预先科学规划生态过程的变化对景观格局的影响,或当景观格局发生变化将会引发那些生态过程发生,以及如何控制那些不利的生态过程发生是景观规划的核心。然而这些都要求规划者深刻领会景观规划的实质性和程序性两种主要理论体系。

3 实质性理论研究

托马斯·库恩^[10]在他的《科学革命的结构》著作中提出了“范式”一词,“范式”具有:①一个成功的范式能使它的拥护者选择它,而不去选择其他的范式;②成功的范式中会有一些有研究价值而且还包含了一些目前未解决但必须解决的种种科学问题,能吸引它的拥护者去研究解决它们。也就是说某些目前未解决但必须解决的种种科学问题,迫使人们提升理论知识,进行技术革命提出新的范式,用一种新的方式解释那些目前无法解决的问题^[10]。因此,景观规划实质性理论研究,实质上是对理论范式流变的研究。景观如何连接^[11-14]、生态格局要怎样安全^[15]、如何处理“源”“汇”的关系^[16]等,这些理论属于实质性理论。

3.1 “格局-过程-尺度”范式 由于格局具有空间和时间尺度,过程也具有空间和时间尺度,因此,景观规划理论研究中,最先研究的是寻求如何处理“格局-过程-尺度”的理论^[17]。生态过程是非常复杂的,有些又是很抽象的,因此,很难对生态过程特征和演变规律直接进行定量研究。研究者从被称为“空间生态学”的景观生态学中寻求空间规划的科学理论基础^[18-20],往往通过模型技术、数学技术、计算机技术分析研究景观空间格局发生变化将会引发那些新的生态过程发生,以及对景观格局的影响^[21-22]。

3.2 “格局-过程-服务-可持续性”范式 自然生态系统具有服务功能及服务价值^[23],因此,自然生态系统是怎样为人类社会服务的,它们之间是如何进行相互作用的,这些已成为景观生态学家关注的焦点。因此,自然系统和人类需求之间用自然系统对人类的服务这条链把它们联系起来,在探讨格局与过程相互作用机制的基础上,分析自然景观与人类经济社会之间的关系,成为景观规划者的共识^[24-25]。一个生态系统具有服务价值,是由系统各因子的共同作用产生的。同样,景观服务价值也是景观各层次相互作用产生的。景观生态学者一直注重景观服务功能及景观服务价值,并探讨怎样才能使景观发挥更好的服务,如何保持景观健康发展等理论,由此形成了“格局-过程-服务-可持续性”的理论新范式^[26-27]。

3.3 “格局-过程-设计”范式 21世纪初以来,国际上一些学者在规划实践中对生态科学的有效性进行反思,发现规划实践中存在的抗解问题,并不能完全用生态科学知识有效解决。生态学要求景观系统结构是稳定的、均衡的。如果一味追求格局-过程的稳定,其功能不能更好地为人类提供福祉

的话,就不符合景观规划设计者的初衷。但一味要求景观功能发挥更大的作用,索取景观为人类服务的更多价值,景观的格局将会被破坏,其过程将不可能持续。这就要求景观规划既要合乎生态学原理,又要体现人的主观能动性的作用。在这种思路下,一种新的“格局-过程-设计”理论范式被提出。这种理论范式把景观格局及生态过程的相互关系与科学理论用空间设计相连接,在特定场地中利用被当作假设这种空间设计模式不断监测、评价设计的结果,检验相关的科学理论,使景观规划设计更优化和更科学化^[28]。

4 程序性理论研究

景观规划程序性理论是用于景观规划方法的理论。也就是说为预先安排的将景观介入平衡协调人与景观(土地)之间的“格局-过程”关系中的设计所需的基础理论。景观规划初期,生态学概念还没有提出,景观规划者大都从个人主观的思维意识理解格局与过程关系。当生态学概念正式提出后,不仅生态学基本原理是景观规划设计方法中的核心理论,而且随着生态学的发展也深深地影响着景观规划设计方法的理论发展。同样用于景观规划方法的理论的演变,是景观规划方法中将生态学理论基础的应用不断提升的范式流变。

4.1 经验范式 1856年弗雷德里克·奥姆斯特德(Frederick Olmste)等为纽约中央公园的规划设计,就已经显示了风景园林规划设计的基本内涵^[29]。当时没有出现生态学概念(1866年才正式提出),因而有关风景园林规划设计的生态学相关原理,并没有应用在纽约中央公园风景园林设计中。当时对格局与过程关系的理解依然是凭个人主观的思维意识和传统经验。尽管1893年有学者在景观规划中应用了叠图法,出现了景观规划设计与生态学融合迹象,然而,19世纪中期—20世纪初期,生态学基本原理还未渗入风景园林,它们之间还未融合。因而19世纪中期—20世纪初期的景观规划设计理论属于经验范式阶段。

4.2 实证范式 随着生态学的发展,生态学理论逐渐成为风景园林中的基础理论,风景园林规划设计师们已意识到格局与过程关系进行定量分析的重要性。在解决当时环境伤害和区域土地有效利用等问题上^[31-32],也已意识到在景观规划中需要基于生态学的模型分析和定量分析^[31-32]。这样不仅能做到只要获等相同的数据,那么结论也是相同的,便于规划设计方案的纵向或横向对比的科学分析;而且景观规划的原则由生态科学研究成果直接指导,风景园林的规划变成了生态学科的实践应用^[33],既丰富了风景园林规划的理论,又促进了生态学科研究领域的扩展。目前规划实证范式有LANDEP体系、奥德姆的分室流模型等^[34]。

4.3 综合范式 人类与自然系统的相互作用是复杂、多变的。人类活动能强烈干扰、破坏自然系统,受到强烈干扰、破坏的自然系统将反过来给人类生产和生活带来很大的困扰。经验范式只注重景观空间格局的物理维度和景观过程的常态变化,这种规划设计忽略了景观的生态结构、人类活动和社会经济的多重影响,无法解决人类与自然和谐共存可持续

的关键问题。拓开“格局-过程”这一传统的景观规划设计范式,把景观的生态要素与人类活动和社会经济层面联系在一起,提升景观(自然)与人类和谐共存可持续性成为景观规划师共同关注的议题。因此,一些学者在规划设计时以景观服务作为一条纽带,把人类活动及社会经济与景观系统的相互作用结合起来,从生态学原理和设计思路、目标多方位出发为人类与自然和谐共存可持续性提出了新的规划设计框架^[3,28,32],即规划设计的综合范式。

4.4 试验范式 由于不同景观具有不同特殊性,而且目前生态学基础理论并未完全完善,这就带来了规划过程中的不确定性。为了减少风险,少走弯路,近年来一些学者为适应不同特殊性景观,提出了探索性规划框架,也就是说这个规划框架是“边学边做”形成的^[35]，“失败也安全”的试验性设计^[36]成为解决规划过程中的不确定性的一种有效方法。“边学边做”或“试验性设计”如同实证研究一样,把试验设计(非结论而是假说的)放在一个以景观作为的试验场进行试验,建立检测反馈机制,全程检测试验设计运行状态,不断修正试验设计中不确定性成分^[9]。通过试验设计不断完善格局与过程关系,使设计师在规划过程中遇到不确定性时,能够及时提出可行的设计方案,或解决问题的有效对策。近年来国内出现的“设计科研”体系^[37]，“生态智慧指引下的实践”研究范式^[38-39]，“最小累积阻力模型”^[40]，“生态安全格局”^[41]等都属于景观规划程序性理论试验范式范畴。

5 展望

无论是实质性理论还是程序性理论,都是从生态学、地理学等自然科学的原理中获得的。设计师们通过“表面分析模型”“最小累积阻力模型”和适宜性分析来识别景观某单一生态过程的安全格局。在此基础上采用权重法将各单一过程的安全格局综合叠加得到景观综合生态安全格局。这种景观生态安全格局的构建是建立在景观格局不同生态过程之间不存在协同或权衡关系,彼此间相互兼容这种假设的基础上。然而,一种景观格局有多种生态过程,有些过程可能处于主导作用地位,有些过程处于从属作用地位,甚至有些过程作用被减弱而屏蔽。因此,一种景观格局所对应的多种生态过程之间并非相互兼容,而是存在密切的相互作用关系,这些作用关系是不能简单叠加的。如果用一般假设条件的景观格局生态过程直接应用于具体景观的试验设计中,肯定不可能完全得到预期想要的东西。所以解决景观格局中各种生态过程之间的相互关系,不仅需要从历史上成功的实践案例中寻求启迪,对生态学知识的选择与应用进行反思,如何利用生态学新的原理寻求新的解决方法将更具有实践意义。景观规划是如何控制人类的行为,保护和利用好自然资源,使人类社会系统与自然界系统之间能相互协调共同发展为目的的人为预先的安排,必然会涉及景观格局中多个生态过程的研究。因此,分析多个生态过程对景观施加的作用,探讨它们相互之间的作用机制,这对景观规划而言是必须先行的一步。

一般而言,是用生态学、景观生态学的基本原理分析景

观格局与过程关系。然而是用生态学、景观生态学的基本原理对某些事物研究得出的知识或理论,在景观设计的实践中并非全部都能适用^[6]。当然,自然科学的基础理论,大都是通过试验验证后得出的,然而,任何实验室方法都不可能无限地模拟任何一个自然生态系统的演变过程,也不可能还原景观所有格局与过程的全部关系^[42]。理论的抽象性和普适性,历来是科学知识追求的^[43]。然而,规划设计师面临的可能是不同地理条件、社会环境、人文因素的独特景观,规划设计方案也必须依照景观的具体条件而定。因此,对一个具体景观进行规划时应视具体情况而定,不能生搬硬套普适性自然科学知识,否则将达不到设计的预期目标。

目前,有关景观规划的理论还不够完善,探研出景观规划的新理论,是景观规划未来研究中急需解决的问题。而且,对一个景观进行规划设计时,如何使景观更好地为人类发挥其服务效应,也是景观规划设计者需要认真对待的重要课题。

参考文献

- [1] GOBSTER P H, XIANG W N. A revised aims and scope for landscape and Urban planning: An international journal of landscape science, planning and design [J]. *Landscape & urban planning*, 2012, 106(4): 289-292.
- [2] Council of Europe. Presentation of the European landscape convention of the Council Europe [DB/OL]. [2017-06-21]. <http://www.coe.int/en/web/landscape/about-the-convention/>.
- [3] AHERN J. Spatial concepts, planning strategies, and future scenarios: A framework method for integrating landscape ecology and landscape planning [M]//JEFFREY M K, ROBERT H G. *Landscape ecological analysis: Issues and applications*. New York: Springer, 1999: 175-201.
- [4] 孙筱祥. 风景园林(LANDSCAPE ARCHITECTURE)从造园术、造园艺术、风景造园——到风景园林、地球表层规划[J]. *中国园林*, 2002(4): 7-12.
- [5] SEDDON G. Landscape planning: A conceptual perspective [J]. *Landscape & urban planning*, 1986, 13: 335-347.
- [6] 康世磊, 岳邦瑞. 风景园林规划中的格局-过程关系理论研究综述[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(1): 139-143.
- [7] NDUBISI F O. A synthesis of approaches to ecological planning [M]//NDUBISI F O. *The ecological design and planning reader*. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2014: 404-426.
- [8] 尼格尔·泰勒. 1945年后西方城市规划理论的流变 [M]. 李白玉, 陈贞, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] 岳邦瑞, 康世磊. 景观规划理论的类型与范式研究综述[J]. *风景园林*, 2020, 27(3): 63-68.
- [10] 托马斯·库恩. 科学革命的结构 [M]. 金吾伦, 胡新和, 译. 北京: 北京大学出版社, 2012: 8.
- [11] HUBER P R, SHILLING F, THORNE J H, et al. Municipal and regional habitat connectivity planning [J]. *Landscape & urban planning*, 2012, 105(1/2): 15-26.
- [12] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [13] ADRIAENSEN F, CHARDON J P, DE BLUST G, et al. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model [J]. *Landscape & urban planning*, 2003, 64(4): 233-247.
- [14] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 景观连接度的概念、度量及其应用 [J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [15] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义 [J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [16] YU K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning [J]. *Landscape & urban planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [17] PETERS D P C, BESTELMEYER B T, TURNER M G. Cross-scale interactions and changing pattern-process relationships: Consequences for system dynamics [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(5): 790-796.
- [18] AHERN J. Integration of landscape ecology and landscape architecture: An evolutionary and reciprocal process [M]//WIENS J A, MOSS M R. *Issues and perspectives in landscape ecology*. Cambridge: Cambridge University

- Press, 2005; 311-319.
- [19] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010; 5.
- [20] MAKHZOUMI J M. Landscape ecology as a foundation for landscape architecture: Application in Malta [J]. Landscape & urban planning, 2000, 50(1/2/3): 167-177.
- [21] 胡巍巍, 王根绪, 邓伟. 景观格局与生态过程相互关系研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 18-24.
- [22] 朱槐文, 孟庆香, 宋二红, 等. 景观格局—生态过程研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(1): 211-214.
- [23] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [24] WU J G. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes [J]. Landscape ecology, 2013, 28(6): 999-1023.
- [25] TERMORSHUIZEN J W, OPDAM P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development [J]. Landscape ecology, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [26] 范昊, 赵文武, 丁婧祎. 连接景观异质性与社会环境系统: 2017年美国景观生态学年会(The US-IALE 2017 Annual Meeting)会议述评[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4919-4922.
- [27] 李琰, 李双成, 高阳, 等. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架[J]. 地理学报, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [28] TERMORSHUIZEN J W, OPDAM P, VAN DEN BRINK A. Incorporating ecological sustainability into landscape planning [J]. Landscape & urban planning, 2007, 79(3/4): 374-384.
- [29] 于沁沁. 寻踪—生态主义思想在西方近现代风景园林中的产生、发展与实践[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [30] 岳邦瑞. 图解景观生态规划设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [31] COLLINS J P, KINZIG A, GRIMM N B, et al. A new urban ecology [J]. American scientist, 2000, 88(5): 416-425.
- [32] LEITÃO A B, AHERN J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning [J]. Landscape & urban planning, 2002, 59(2): 65-93.
- [33] 伊恩·伦诺克斯·麦克哈格. 设计结合自然[M]. 黄经纬, 译. 天津: 天津大学出版社, 2008.
- [34] 福斯特·恩杜比斯. 生态规划历史比较与分析[M]. 陈蔚镇, 王云才, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [35] KATO S, AHERN J. 'Learning by doing': Adaptive planning as a strategy to address uncertainty in planning [J]. Journal of environmental planning and management, 2008, 51(4): 543-559.
- [36] 王志芳. 生态实践智慧与可实践生态知识[J]. 国际城市规划, 2017, 32(4): 16-21.
- [37] 王志芳, 李明翰. 如何建构风景园林的“设计科研”体系? [J]. 中国园林, 2016, 32(4): 10-15.
- [38] XIANG W N. *Ecophronesis*: The ecological practical wisdom for and from ecological practice [J]. Landscape and urban planning, 2016, 155: 53-60.
- [39] XIANG W N. Doing real and permanent good in landscape and urban planning: Ecological wisdom for urban sustainability [J]. Landscape & urban planning, 2014, 121: 65-69.
- [40] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [41] 俞孔坚, 李迪华. 景观设计: 专业学科与教育[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [42] 李际. 生态学假说判决性实验的验证方法[J]. 科技导报, 2016, 34(13): 93-98.
- [43] KNIGHT A T, COWLING R M, CAMPBELL B M. An operational model for implementing conservation action [J]. Conservation biology, 2006, 20(2): 408-419.

(上接第 17 页)

- [34] YANG K, OH C, HWANG S. Optimizing volatile fatty acid production in partial acidogenesis of swine wastewater [J]. Water science & technology, 2004, 50(8): 169-176.
- [35] 周琪, 陈银广, 李咏梅. 污水厂剩余污泥的资源化利用——污水厂剩余污泥中的碳、氮、磷回收与资源化利用的研究进展[J]. 流程工业, 2012(8): 36-38.
- [36] HEIDRICH E S, CURTIS T P, DOLFING J. Determination of the internal chemical energy of wastewater [J]. Environmental science & technology, 2011, 45(2): 827-832.
- [37] 陈振民. 提高厌氧处理甲烷生成量方法的初步探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004(5): 43-47.
- [38] 翟一帆, 袁青彬, 胡南. 养猪废水处理系统微生物群落结构变化及影响因素研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 88-94.
- [39] SCHRÖDER J J, UENK D, HILHORST G J. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland [J]. Plant & soil, 2007, 299(1/2): 83-99.
- [40] LE CORRE K S, VALSAMI-JONES E B, HOBBS P C, et al. Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review [J]. Critical reviews in environmental science & technology, 2009, 39(6): 433-477.
- [41] LA J, KIM T Y, JANG J K, et al. Ammonia nitrogen removal and recovery from swine wastewater by microwave radiation [J]. Environmental engineering research, 2014, 19(4): 381-385.
- [42] 宋小燕, 刘锐, 税勇, 等. 间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1873-1879.
- [43] 袁鹏, 宋永会, 袁芳, 等. 磷酸铵镁结晶法去除和回收养猪废水中营养元素的实验研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1127-1134.
- [44] LIN H J, LIN Y Q, WANG D H, et al. Ammonium removal from digested effluent of swine wastewater by using solid residue from magnesium-hydroxide flue gas desulfurization process [J]. Journal of industrial & engineering chemistry, 2018, 58: 148-154.
- [45] 巫小丹, 岑庆静, 吴冬梅, 等. 猪场沼液高值化综合利用研究进展及前景分析 [J]. 中国沼气, 2019, 37(2): 69-74.
- [46] CAO L P, WANG J J, XIANG S Y, et al. Nutrient removal from digested swine wastewater by combining ammonia stripping with struvite precipitation [J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(7): 6725-6734.
- [47] QUAN X J, YE C Y, XIONG Y Q, et al. Simultaneous removal of ammonia, P and COD from anaerobically digested piggery wastewater using an integrated process of chemical precipitation and air stripping [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 178(1/2/3): 326-332.
- [48] BONMATÍ A, FLOTATS X. Air stripping of ammonia from pig slurry: Characterisation and feasibility as a pre-or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion [J]. Waste management, 2003, 23(3): 261-272.
- [49] LEI X H, SUGIURA N, FENG C P, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. Journal of hazardous materials, 2007, 145(3): 391-397.