综述

绿墙系统灰水处理技术研究进展*

陈晓育[1] 何其多[1] 杨成建[2] 李晶晶[2] 徐 娅[1] 白江涛[2] 王静怡[1]

1 西安建筑科技大学艺术学院 西安 710055

2 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西安 710055

摘要：在我国城市内涵发展新阶段，绿墙与灰水处理技术结合，既能化解“人绿争水”的矛盾，又能实现生活污水的就地净化与利用，具有“降碳、减污、扩绿、增长”等多重效益，表现出良好的应用前景。文章在对绿墙处理灰水系统的结构特性、净化机理、净化效能与节水潜力 4 个方面进行总结的基础上，从工艺、基质、植物和运行条件等角度解析影响绿墙处理灰水效率的主要因素，并归纳出绿墙作为新型灰水生态处理技术的优势，以及提高绿墙系统处理性能的主要方法。最后，就地域适应性、微生物机理、生命周期、风险评估、节能分析等方面提出绿墙系统灰水处理技术的研究展望。

关键词：节水型绿墙；灰水回用；净化效能；影响因素

DOI：10.12169/zgcsly.2024.05.24.0001

A Research Review of Greywater Treatments Using Green Walls

Chen Xiaoyu[1] He Qiduo[1] Yang Chengjian[2] Li Jingjing[2] Xu Ya[1] Bai Jiangtao[2] Wang Jingyi[1]

(1. College of Art, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In the new stage of urban development in China, the combination of green walls and greywater treatments can not only resolve the issue "people-green space competition for water", but also achieve *in situ* sewage purification and utilization. This technology has promising prospects of application because of its multiple benefits such as carbon reduction, pollution reduction, green space expansion and economic development. The paper summarizes structural characteristics, purification mechanisms, purification efficacy, and potential water-saving for greywater treatment with green walls, analyzes the main factors affecting the efficiency of using green walls to treat greywater from the perspectives of processes, substrates, plants, and operating conditions, and concludes the advantages of green walls as the new nature-based technology for greywater treatment and the major methods to improve the performance of green walls in the treatment. At the end, the research prospects for the technology are discussed in terms of geographical adaptability, microbial mechanisms, life cycles, risk assessment, and energy-saving analyses.

Keywords: water-saving green wall; greywater reuse; purification efficiency; influencing factor

收稿日期：2024-05-24

* 基金项目：陕西省重点研发计划项目（2020SF-399）；陕西省重点研发计划项目（2023-YBNY-269）

第一作者：陈晓育（1978- ），女，硕士，副教授，研究方向为生态可持续建筑及景观水处理。E-mail：478708575@qq.com

何其多（2000- ），女，硕士生，研究方向为立体绿化环境效益。E-mail：1056102729@qq.com

通信作者：杨成建（1978- ），男，硕士，高级工程师，研究方向为绿色建筑给排水技术。E-mail：20108071@qq.com

当前我国城市进入内涵发展新阶段，绿色基础设施建设成为重要内容。然而在过去一段时间内，“人绿争水”的矛盾一直没有很好地解决，在水资源稀缺的中国华北、西北地区更为突出，灌溉量是西南、华南地区的 3~4 倍[1]。绿墙作为应用于高密度城市的新型绿色基础设施，其高需水性同样成为制约应用的痛点。资料表明，绿墙的日需水量可达 1~20 L · m^{-2}[2]，虽然可通过节水浇灌[3]、使用保水材料[4]等措施减少灌溉量，但是仍未从根本上解决绿墙对水的消耗。如何改进现有措施，实现“水绿平衡”成为关键。

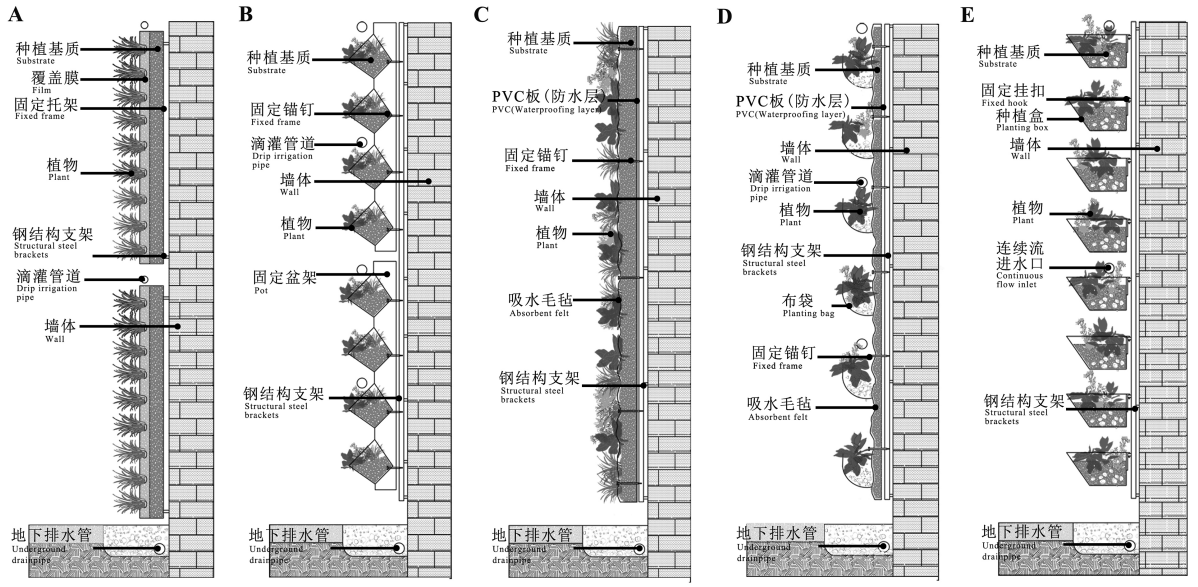
绿墙系统与灰水处理系统的结合将绿墙从“水消费者”转换为“水生产者”，

促进低品质水源的高品质利用，化解了“人绿争水”的矛盾[5]。在 Web of Science、ScienceDirect 与 CNKI 数据库中对绿墙（green wall 或 green facade）与灰水（greywater）两个关键词进行合并检索发现，近 10 年来国外关于绿墙系统灰水处理技术的相关研究逐年上涨，其中澳大利亚、卡塔尔、意大利区域研究广泛（共计 51 篇有效文献），但是国内对绿墙的研究仍集中在建筑节能、环境改善、工艺设计等方面[6-9]，仅在 2022 年施凡[10]、曹晶刚[11]等硕士论文初步探讨绿墙对灰水、黑水及工业废水的处理效能。与国外相比，我国在研究深度、研究系统性及工程应用等方面仍有差距。因此，有必要综合国外相关研究，分析绿墙处理灰水的效能、影响因素及优化方法，为国内绿墙系统灰水处理技术的研究与应用提供参考，为新型绿色基础设施的开发提供思路。

1　绿墙的分类与灰水处理系统的结构特性

1.1　绿墙的分类

绿墙是一种利用城市建筑立面开展的绿化方式，从结构特性角度可分为传统绿色外墙和新型生态墙[12]。传统绿色外墙指通过攀爬或悬挂植物形成直接贴在墙面或借助间接支撑系统的绿墙，是最简单的垂直绿化应用方式[13]。新型生态绿墙指通过墙体支撑结构、基质载体、基质、植物和灌溉排水等要素组成的一种墙体系统，可分为单元框架式、卡盆式、草平毯式、布袋式及种植盒容器式[14]（图 1）。



注：A 单元框架式；B 卡盆式；C 草平毯式；D 布袋式；E 种植盒容器式。

图 1　新型生态绿墙主要类型

1.2　绿墙灰水处理系统的结构特性

种植盒容器式绿墙是广泛应用于灰水处理的工艺方式，这种设计使水流从顶层进入，逐层下渗，最终由底层排出或循环，类似于阶梯式人工湿地。传统绿色外墙种植攀爬植物的地面生物滞留池也可以用于处理灰水，但灰水的间歇性产生会导致滞留池上层（过滤层）含氧过高，下层（缺氧层）缺少碳源，影响氮的去除，同时由于

滞留池的面积与深度远小于传统生物滞留池，负荷能力低，极易黑臭[15-16]。此外，其他新型生态绿墙如单元框架式、卡盆式、草平毯式及布袋式，采用喷灌或滴灌易出现系统堵塞、飘散水滴携带病原体、水力停留时间短[17]等问题，同样不适用于灰水处理。种植盒容器式生态绿墙采用连续流方式，每个种植盒作为一个独立处理单元，基质体积较大，植物种植便捷，溶氧环境多样且可控，可通过灵活拼接种植盒以控制水力停留时间，适应于不同水力负荷与污染负荷，便于维护管理[16,18]。处理灰水的流程为：各家庭灰水汇集至沉淀池（可以独户设置，也可以联户设置），经沉淀后流入绿墙系统，层层下渗净化，最后通过排水沟进入地下蓄水池补充建筑、地面用水。在干旱季节或者无家庭灰水产生时，可将蓄水池中的水提升至绿墙顶部代替沉淀池出水，满足植物生长和系统运行（图 2）。

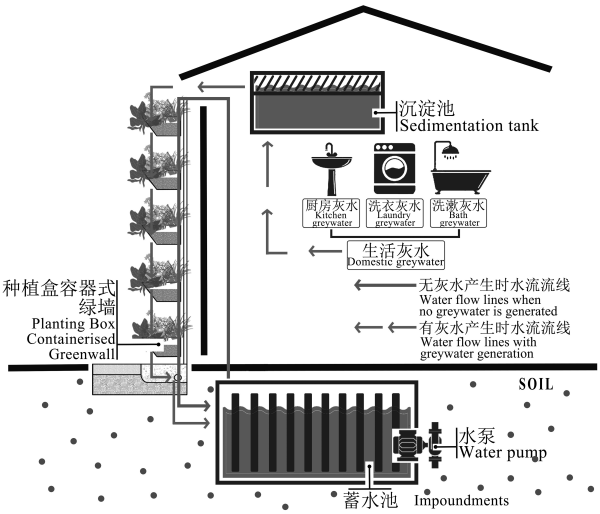


图 2 种植盒容器式生态绿墙处理生活灰水的运行过程

2 绿墙对灰水的净化机理

绿墙系统通过基质、植物和微生物的协同作用实现灰水中的有机物、氮（N）、磷（P）等主要污染物的去除[5,19]。每个种植盒作为独立单元可分为 3 个区域：上层覆盖区、中部根系区和底部厌氧区，并对应不同的净化机制（图 3）。上层覆盖区通过物理或化学吸附去除悬浮固体、化学需氧量（COD）、氮（N）和磷（P），同时通过硝化作用去除有机氮[20]。中部根系区通过植物根系吸收和根系附着的生物膜吸附氮、磷和有机物[21-22]，协同微生物对氮、磷产生同化固定作用[23]。底部厌氧区通过反硝化和聚磷作用去除氮磷[21]。由此可知，灰水中的氮主要通过植物吸收、基质过滤吸附、沉积固定、硝化反硝化及氨

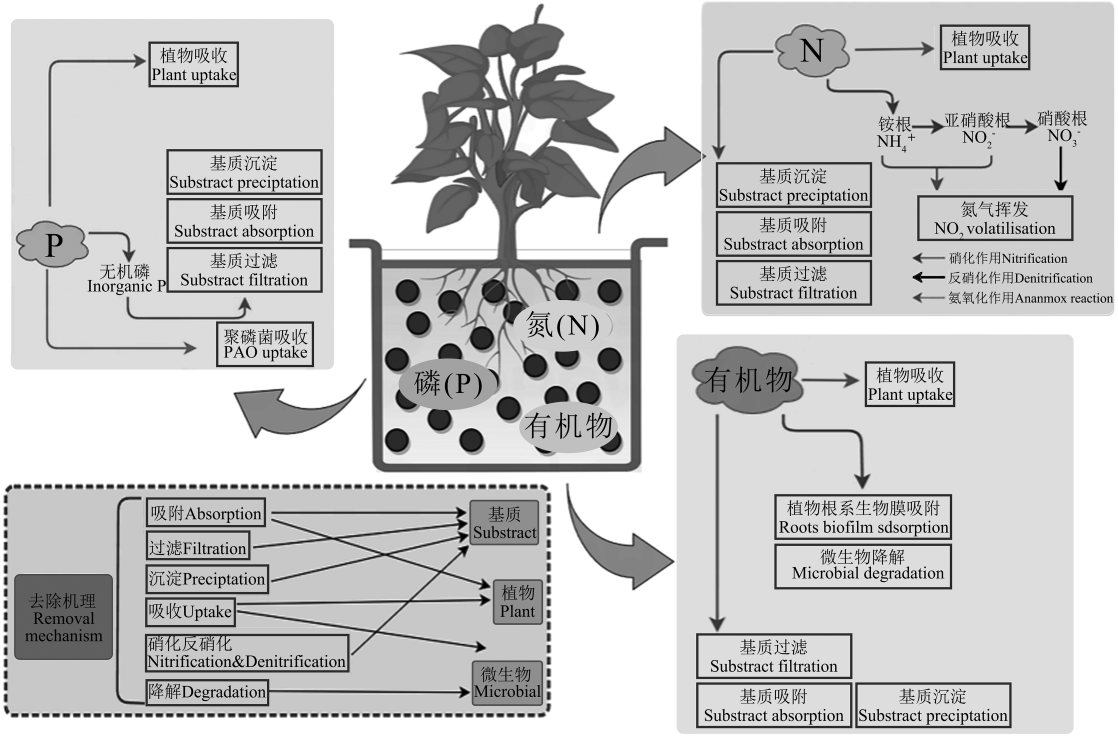


图 3 种植盒容器式生态墙对灰水中主要污染物的去除机理示意图

氧化等途径去除；磷主要通过植物吸收、基质过滤吸附、沉积固定、聚磷菌吸收等途径去除；有机物则主要通过植物吸收、基质过滤吸附、沉积固定、植物根系生物膜吸附、微生物降解等途径去除。通过将种植盒上下拼接形成多层多级结构（类似多级 A^2O 水处理工艺），能进一步增强基质、植物和微生物的协同作用，提高抗冲击负荷能力[16]。

3　绿墙处理灰水的净化效能与节水潜力

3.1　灰水净化效能

灰水包括厨房、洗衣和洗漱废水，其特性受用户特征、清洁产品选择、设施和地区差异影响，不同国家/地区的灰水特性差异很大[24]，还可能包含致病性大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌等多种微生物病原体[25]。短时间贮存会降低灰水中生化需氧量（BOD）和溶解氧量（DO）水平，但在 48 h 后整体水质急剧退化[26]。

种植盒容器式生态绿墙灰水处理技术与人工快速渗滤系统和阶梯式人工湿地类似，但具有更多优势：1）有效利用垂直空间灵活运用于高密度城区，降低碳足迹，投入和维护成本较低[27]；2）灰水在浅层基质（10～20 cm）中渗滤，溶氧环境多样，微生物活性高，处理效能强[21]，可通过层数调整控制水力停留时间[16]。3）绿墙基质根据灰水产生的变化时序形成干湿交替环境，促进植物生长和根系生物膜的脱落减少堵塞[28]，有利于硝化与反硝化及聚磷菌作用[17,21,29]。4）利用重力势能输送灰水，减少能耗和管路需求，与雨洪结合有望实现基质冲洗[30]。5）绿墙的高通风状态及开放表面有利于气味控制及真菌和病原体发散[31]。综合国内外研究结果[5,21,32]，绿墙对灰水具有较高净化效能，总悬浮固体（TTS）去除范围约为 30%～95%，COD 约为 50%～85%，BOD_5约为 70%～90%，TN 约为 40%～95%，TP 约为 30%～50%。此外，绿墙对灰水中的特殊污染物也有一定的去除能力，如 Dalahmeh 等[33]实现了部分药物成分的去除，卡马西平、美托洛尔、雷尼替丁和咖啡因的去除率分别为 7%～99%、37%～98%、97%～99% 和 96%～98%。Estelrich 等[34]将绿墙与紫外线消毒技术结合，对大肠杆菌的去除达到了 4 log 以上。除灰水外，Wolcott 等[35]发现，绿墙对啤酒废水中 BOD 的去除率达到了 70%～80%、对 TN 的去除率达到了 56%、对 TP 的去除率达到了 12%～28%，说明绿墙具有应用于工业场地软化和工业污水处理的潜力（工业用水费用高，中水回用经济效益更明显）。

3.2　城市节水潜力

绿墙处理灰水系统的节水潜力主要表现在两个方面：一是开源，即净化回用；二是节流，即减少灌溉。在开源方面，全球城市快速发展带来大量污水，预计到 2030 年污水量达 4.712×10^{11} m^3，2050 年增至 5.738×10^{11} m^3[36]。资料显示，全球城市污水中灰水占 70%左右，将灰水从污水中分离并回用可实现 40%～50%的水资源节省[37]。在我国，住宅和办公楼的灰水产量分别占污水总量的 60%和 40% 左右[38]，灰水净化回用的潜力巨大。在节流方面，城市绿化需要消耗大量水资源，我国东部城市绿地的年均灌溉量达 1.2～1.5 $t\cdot m^{-2}$[39]，绿墙系统灰水处理技术避免了系统对外部灌溉的依赖，还可以补充建筑和地面绿化用水。Svete[18]发现，1 m^2左右的绿墙系统即可处理四口之家日均 400 L 的灰水量。《西澳大利亚州灰水再利用业务守则》（*Code of practice for the reuse of greywater in Western Australia*）中指出，如果将三层住宅的外立面全部安装绿墙用于处理建筑的洗漱灰水（约 1.6×10^6L），不但能满足绿墙的年灌溉量（约 0.6×10^6L），还能满足建筑的年厕所冲洗需求（约 0.6×10^6L），还将留下 0.4×10^6L 用于地面绿化。此外，绿墙处理灰水具有较好的投资回报效率，Estelrich 等[34]根据西班牙能源价格对其投资回报年限进行估算，若系统运行 20 年，灰水日处理量分别为 10.5 m^3和 20 m^3，则投资回收期分别为 10.1 年和 9.0 年。综上可知，绿墙系统灰水处理技术净化效能高、节水潜力大，相较于传统市政污水处理降低了施工影响和成本消耗及碳排放，实现了城市可持续发展理念下的绿色水循环。

4　绿墙处理灰水系统的主要影响因素

4.1　工艺设计

绿墙系统的工艺设计包括种植盒形状、基质

深度、层级高度等，不同的工艺设计会对进水负荷能力、水力停留时间、气味发散、营养物质分布及硝化反硝化过程等产生影响。种植盒可分为长方型、V 型、圆型、倒梯型、柱型等形状，不同形状的基质深度和系统布水方式不同，处理效果存在差异，但均表现良好。有学者对圆型和柱型两种绿墙（圆型绿墙由多个独立圆型种植盒排列组成，柱型绿墙为单一整体填充基质的 PVC 圆柱，灰水皆由顶部流入底部流出）进行了研究，，对比结果发现，虽然二者的净化效率表现良好且相似，但在维护方面各具优势，圆型绿墙的基质较浅且单元独立，易于维护和气味控制；柱型绿墙的基质较深且大块整装，保水能力更好，易出现生物膜堵塞[16]。在长方型种植盒的绿墙研究中，灰水由泵输送至顶层种植盒底部，沿底部以平流方式依次进入下一层，实现了 97.1%的 BOD 去除率，96.6%的 COD 去除率和 74%的总氮去除率[40]。一般情况下，绿墙种植盒的层数越多水力停留时间越长，上层下层的营养分布差异性也越大。Prodanovic 等[16]发现，两层种植盒高度（一层基质高约 200 mm）的绿墙去除效果最佳，当系统达到三层及以上时，底层植物将出现氮磷缺乏现象。因此，可以从上至下布置营养需求量依次递减的植物，或采取多层进水的方式以均衡植物营养供给；还可以在种植盒基质底层设计淹没区促进反硝化作用，提高脱氮效率，增强系统在干燥期的弹性[21]。植物荣枯对绿墙的处理效率影响较小，Prodanovic 等[32]对比有植被和无植被绿墙发现，二者对 TN 的去除率差异为 6%，对 TP 的去除率差异为 15%。

4.2 基质类型与组合

绿墙基质对去除污染物、支持植物生长和微生物代谢至关重要，基质的粒径、空隙大小和孔隙度会影响水和营养物质的渗透速率以及生物膜的生长和好氧性[41]。粒径、空隙较小和低孔隙度的基质去除效果更好[42]，但过慢的渗透速率可能会影响植物生长或导致系统堵塞[29]，如果与大粒径、大空隙基质组合既可以保证系统的处理效率又可以延长使用寿命。有机和无机基质以合适的配比组合也可以提升灰水处理效果[43-46]。Abd-ur-Rehman 等[43]发现，椰壳纤维和沸石分别对疏水性有机化合物和亲水性有机化合物吸附去除效果最好；Prodanovic 等[44]发现，珍珠岩与椰壳纤维以 2∶1~3∶1 组合时处理效果最佳；Galvão 等[45]也得出相似的结论，当碎瓷砖与椰壳纤维 7∶3 混合时，绿墙对 COD 和 TSS 的去除率最高。Ascione 等[46]将 1∶1 混合的椰壳纤维和膨润土与 1∶1 混合的砂和膨润土进行对比，发现前者比后者的 COD 去除率高 7%左右。此外，很多学者还开展了传统基质与回收废料（如咖啡渣、椰枣核等）、新型基质（如生物炭、石墨烯、活性炭、矿物质等）、新型废料（如堆肥固体废料、大麻纤维废料、聚酯废料等）的对比或组合研究[34,43,47-50]，结果发现咖啡渣与椰壳纤维的处理性能相似[42]；生物炭可以显著提升传统基质（椰壳纤维和珍珠岩）的污染物去除效果[49]，还能满足大肠杆菌及药物成分的去除[34,50]；使用含有铁（Fe）、铝（Al）、镁（Mg）和钙（Ca）的矿物质基质可以促进磷的去除[47]；将堆肥固体废物与浮岩 2∶1 混合，对灰水中 BOD、TN、TP 的去除率可以达到 99%、82%、85%[48]。

4.3 植物种类与配置

植物是绿墙的美学焦点，提供了气候改善等环境效益，并通过氮磷吸收、根系微生物吸附代谢等方式净化灰水，不同植物种类及组合有着不同的净化效果。大多数植物对氮的去除率都较高（>80%）[21]，其中，苔草（*Carex appressa*）和金伯利女王蕨（*Nephrolepis obliterata*）高达 98%[32]。只有少部分植物能够实现磷的有效去除，苔草和葡萄藤（*Grape vine*）可以分别实现 67%和 53%的去除率[21]，植物生长会促进磷的去除效果提升[32]。绿墙植物的选择需考虑耐旱耐涝性、耐高污染负荷性、耗水性及景观特性，重点兼顾植物的保水与排水，实现水量平衡[51]。Pradhan 等[5]对大花马齿苋（*Portulaca grandiflora*）、金边红桑（*Acalypha wilkesiana*）、长苞香蒲（*Typha domingensis*）、翠芦莉（*Ruellia brittoniana*）和红龙苋（*Alternanthera dentata*）5 种绿墙植物的保水性与排水速率进行排序发现，植物自身难以兼顾保水与排水平衡。Prodanovic 等[22]发现，麦冬（*Ophiopogon japonicus*）、苔草、金伯利女王蕨、短莛山麦冬（*Liriope muscari*）和蔓生苦槛蓝

（*Myoporum parvifolium*）5 种绿墙植物在不同季节、温度和湿度条件下的日耗水量差异很大。综上，建议通过在绿墙顶层使用高耗水量植物，底层使用低耗水量植物实现系统的水量平衡。每层多种植物搭配能促进植物根系间的相互作用、营养物质的分配与吸收，有利于污染物去除和植物生长，适合干旱环境；但单一植物可以避免种间竞争，具有不易堵塞、异味少、易维护的优势[16]。

4.4　水力负荷与污染负荷

水力负荷和污染负荷是判断绿墙灰水处理能力的重要参数。对于人工湿地、生物滞留池、人工滤池而言，较高的灰水进水负荷可能会对污染物去除过程（如反硝化）中所必需的厌氧和缺氧条件产生较大影响[52]，但灰水负荷的增加对绿墙系统的去除率整体影响较小[21,42,53]，Kotsia 等[53]将绿墙灰水进水水力负荷从 74 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 增加到 110 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 时，污染物的去除效率仅减少了 3% 左右。因此，当灰水水量大或绿墙面积受限的情况下，可以适当增加水力负荷。Prodanovic 等[32]建议绿墙的水力负荷可在 30~60 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 进行调整；Svete 等[18]以 0.54 m^2 的绿墙实现了 650~1 000 $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 的高水力负荷，且去除率表现优异。绿墙对灰水进水负荷的弹性适用源于对污染负荷的高适应能力，甚至在较高的污染负荷下具有更好的去除能力。Lakho 等[54]在两个阶段分别对系统进入不同污染浓度的灰水发现，高污染负荷的第二阶段去除率比前者提高了 10%~39%。尽管如此，高污染负荷情况下需考虑植物的耐受阈值，如 Eregno 等[55]发现，灰水中少量人体尿液（0.3%~0.6%）的加入会使绿墙系统中的生菜具有更高的叶重比与叶片生物量；但 Fowdar 等[21]发现，当流入较高浓度灰水时，美人蕉、百合的生长情况变差，对总磷的吸收去除率下降了 10%。

4.5　气候条件

气候条件对绿墙的影响体现在植物生长和温湿度变化。低温会减缓植物代谢和微生物活性，降低净化效率[22]；夏季高温会增加植物耗水量达到冬季的 3~4 倍，植物出现枯萎[32]。因此，应权衡植物的耐温和需水性及基质的保水和保温性，如 Boano 等[49]选择了耐低温植物金银花（*Lonicera*）、常春藤（*Hedera*）和苔草，在温带大陆性气候区的冬季对 BOD_5 的去除率仍高达 97.65%±1.34%，对大肠杆菌去除稳定在 2.74±1.55 log，并随着季节变化温度升高，COD 和总氮的去除率增加。Andric 等[56]通过珍珠岩、锯末等材料覆盖保温的方式维持了低温条件下的灰水处理效果。短期的周期性干湿交替（如 1~2 天灌溉，1~2 天干燥）可以为灰水处理过程中的硝化与反硝化作用创造好氧厌氧条件[5]，但长时间的干燥（如干燥期超过 2 周）会影响植物的生长，基质开裂，降低灰水滞留时间，抑制微生物活性，影响净化效能[21,32]。为应对气候变化导致的不定期干燥带来的负面影响，可使用更深、持水性更高的基质或循环进水的方式维持运行（如图 2 中连续箭头所示）。

4.6　运行年限

作为滤床式生态技术，绿墙处理灰水系统的运行年限备受关注。随着年限的增加，系统可能面临堵塞、基质粒径孔隙变化和基质中污染物累积饱和等问题，但大多数研究的持续时间相对较短，持续时间不超过 2 年，因此相关研究少见报道。Costamagna 等[57]对两块不同龄期的绿墙（一块新绿墙，一块已运行 2 年的绿墙）的处理效果对比发现，虽然新绿墙的污染物去除效率显著优于旧绿墙，但二者整体性能均良好，并认为可以通过增加绿墙层级或者通过设置沉淀池预处理等方式来预防基质堵塞（如图 2 中的斜板沉淀池），以保证处理效率，延长系统寿命。

5　结论与展望

绿墙系统灰水处理技术展现出高净化效率、灵活性和低成本的优势，有效解决了城市“人绿争水”导致的水资源短缺，实现了绿化与节水的“双赢”，具有多重效益。本文综合国内外近 10 年的研究，分析了绿墙处理灰水系统的结构特性、净化机理、净化效能与节水潜力，提出了绿墙相比于人工快速渗滤系统和阶梯式人工湿地的优势，并在此基础上从工艺、基质、植物和运行条件等角度解析了影响绿墙处理效率的主要因素，由此总结出提高系统性能的主要策略。在工艺方面，可根据不同的应用场所对种植盒的形状进行选择，

当绿墙的高度过高（基质高>600 mm）时需考虑上下层植物营养的需求平衡，可通过在基质底层设计淹没区的方式提高脱氮效率。在基质方面，需考虑基质粒径、孔隙和孔隙度的大小搭配，在确保透水透气性的同时防止系统堵塞；合适比例的有机与无机基质的组合使用具有更好的处理效果，回收废料与新型材料表现出良好的应用前景。在植物方面，植物的保水与排水性需要重点考虑，宜选择适宜当地气候、耐旱耐涝、耐高污染负荷并具备一定景观美学效果的多种类型植物混合搭配。在运行条件方面，绿墙具有较好的水力负荷和污染负荷能力，但需考虑植物对高污染的耐受性，同时保温保水措施与系统寿命的延长依然是绿墙技术研究的重点。

绿墙处理灰水系统在多领域、多角度实现污水处理减碳目标，是绿化建设与生态化污水处理技术的完美结合，在国外得到了广泛研究，但在我国依然存在空白，与实际推广应用存在差距，在未来还有以下工作需要深入推进。

1）不同地区的本土基质和植物种类的筛选、气候条件对绿墙性能的影响，以及极端气候区的保温保水措施等在未来还需进一步研究。绿墙处理灰水技术的研究地点主要集中在澳大利亚、卡塔尔、意大利等温带海洋性气候、热带沙漠气候和地中海气候区域，针对大陆性气候和季风气候以及极端气候区的研究少见报道。

2）未来还需对基质的饱和时间、植物生命周期、系统组件老化等方面进行全面论证。虽然已有学者关注绿墙处理灰水系统的运行年限，但研究期限短，研究内容不够充分。

3）灰水中的微生物处理机理仍需进一步阐明，污染物在基质-植物-微生物多界面的迁移行为及协同过程还需深入挖掘。绿墙系统的工艺特性与运行特点为系统内部营造了多样的溶氧和营养物质环境，促进了硝化、反硝化和氨氧化等一系列生物反应。未来研究还需进一步阐明微生物的处理机理，识别有利于提升灰水处理效益的微生物群落，并从基质-植物-微生物协同作用的角度筛选满足微生物生长习性的基质与植物种类。

4）绿墙对干湿交替周期和温湿度变化的弹性适应能力与耐受范围以及干湿条件的物理化学过程及生物处理机理尚不清楚，尤其与气候变化、进水条件变化的内在逻辑与耦合方法，还需进一步研究。

5）绿墙系统灰水处理技术的应用需要考虑其生命周期成本（LCC）（包括安装成本、运行维护成本和处置成本）。现有研究的规模较小、周期较短，未来应对系统 LCC 进行更为准确的测算，对系统效益进行更为全面的量化，并协同二者对系统的投资与回报进行更加全面的评估。

6）配套消毒技术和加强与绿墙其他生态技术的整合应用。为确保绿墙系统出水的安全回用，必须有效去除水中的微生物病原体，避免可能会出现的蚊虫滋生、细菌感染、花粉过敏等风险，配套消毒技术的显得尤为关键。此外，统筹降噪、空气净化等绿墙其他生态技术、探索与建筑表皮整合设计及融入城市雨洪管理体系的应用办法，对于绿墙技术的推广同样至关重要。

参考文献

[1]欧玉民,许萍,廖日红,等.城市绿地灌溉水量及其节水潜力探讨[J].节水灌溉,2021(5):71-78.

[2]RILEY B.The state of the art of living walls:lessonslearned[J].Building and Environment,2017,114:219-232.

[3]管超,赵明桥,鲍圣霖,等.新型免维护垂直绿化墙板实验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(1):149-154.

[4]CORTÊS A,ALMEIDA J,DE BRITO J,et al.Water retention and drainage capability of expanded cork agglomerate boards intended for application in green verticalsystems[J].Construction and Building Materials,2019,224:439-446.

[5]PRADHAN S,AL-GHAMDI S G,MACKEY H R.Greywater treatment by ornamental plants and media for an integrated green wall system[J].International Biodeterioration & Biodegradation,2019,145:104792.

[6]王薇,程歆玥.室内垂直绿墙对环境因子时空分布特征影响[J].中国城市林业,2021,19(5):53-59,82.

[7]袁琨,郭佳,陆哲明,等.篱垣型垂直绿化的减噪能力及其影响因素[J].中国城市林业,2021,19(4):67-71.

[8]姜之点,石邢,杨峰.街区尺度微气候影响下的垂直绿化热效应研究[J].暖通空调,2024,54(3):58-67.

[9]蒋博州,何玲,任四维,等.重庆立体绿化中乡土植物的应用评价与筛选[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(8):74-80.

[10]施凡.绿墙系统处理灰水和黑水的研究[D].温州:温州大学,2021.

[11]曹晶刚.基于水资源增效的工业园区垂直绿化设计研究:以

西安现代纺织产业园为例[D].西安:西安建筑科技大学,2022.

[12]MEDL A,STANGL R,FLORINETH F.Vertical greening systems-A review on recent technologies and research advancement[J].Building and Environment,2017,125:227-239.

[13]HUNTER A M,WILLIAMS N S G,RAYNER J P,et al.Quantifying the thermal performance of green façades:a criticalreview[J].Ecological Engineering,2014,63:102-113.

[14]BESIR A B,CUCE E.Green roofsand facades:a comprehensive review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,82:915-939.

[15]MASI F,BRESCIANI R,RIZZO A,et al.Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas:a case-study inPune[J].Journal of Water,Sanitation and Hygiene for Development,2016,6(2):342-347.

[16]PRODANOVIC V,HATT B,MCCARTHY D,et al.Green wall height and designoptimisation for effective greywater pollution treatment and reuse[J].Journal of Environmental Management,2020,261:110173.

[17]LI F Y,WICHMANN K,OTTERPOHL R.Review of the technological approaches for grey water treatment andreuses[J].Science of the Total Environment,2009,407(11):3439-3449.

[18]SVETE L E.Vegetated greywater treatment walls:design modifications for intermittent media filters[D].Norwegian University of Life Sciences,Oslo,2012

[19]PRADHAN S,AL-GHAMDI S G,MACKEY H R.Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs:a review of the applicability and challenges[J].Science of the Total Environment,2019,652:330-344.

[20]FOWDAR H S,DELETIC A,HATT B E,et al.Nitrogen removal in greywater living walls:insights into the governing mechanisms[J].Water,2018,10(4):527.

[21]FOWDAR H S,HATT B E,BREEN P,et al.Designing living walls for greywater treatment[J].Water Research,2017,110:218-232.

[22]PRODANOVIC V,WANG A K,DELETIC A.Assessing water retention and correlation to climate conditions of five plant species in greywater treating greenwalls[J].Water Research,2019,167:115092.

[23]READ J,FLETCHER T D,WEVILL T,et al.Plant traits that enhance pollutant removalfrom stormwater in biofiltration systems[J].International Journal of Phytoremediation,2009,12(1):34-53.

[24]BOANO F,CARUSO A,COSTAMAGNA E,et al.A review of nature-based solutions for greywater treatment:applications,hydraulic design,and environmental benefits[J].Science of the Total Environment,2020,711:134731.

[25]BENAMI M,GILLOR O,GROSS A.The question of pathogen quantification in disinfected graywater[J].Science of the Total Environment,2015,506:496-504.

[26]LIU S,BUTLER D,MEMON F A,et al.Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system[J].Water Research,2010,44(1):267-277.

[27]ZINGER Y,DELETIC A,FLETCHER T D,et al.A dual-modebiofilter system:case study in kfar Sava,Israel[C]//12th International Conference on Urban Drainage,2011.

[28]李春艳,谢珊珊,王文文,等.干湿交替循环频率对生物膜特征及其微生物群落的影响[J].中国环境科学,2023,43(2):854-862.

[29]PRODANOVIC V,HATT B,MCCARTHY D,et al.Green walls for greywater reuse:understanding the role of media on pollutantremoval[J].Ecological Engineering,2017,102:625-635.

[30]PALERMO S A,VIVIANI G,PIROUZ B,et al.Experimental analysis to assess the hydrological efficiency and the nutrient leaching behavior of a new green wall system[J].Science of the Total Environment,2023,901:166301.

[31]CARVALHEIRA M,OEHMEN A,CARVALHO G,et al.The impact of aeration on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms[J].Water Research,2014,66:296-307.

[32]PRODANOVIC V,MCCARTHY D,HATT B,et al.Designing green walls for greywater treatment:the role of plants and operational factors on nutrient removal[J].Ecological Engineering,2019,130:184-195.

[33]DALAHMEH S,AHRENS L,GROS M,et al.Potential of biochar filters for onsite sewage treatment:adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active,inactive and no biofilm[J].Science of the Total Environment,2018,612:192-201.

[34]ESTELRICH M,VOSSE J,COMAS J,et al.Feasibility of vertical ecosystem for sustainable water treatment and reuse in touristicresorts[J].Journal of Environmental Management,2021,294:112968.

[35]WOLCOTT S,CARTER D,ENDRENY T A,et al.Suitability of select micro-green,ornamental and legume plants for use in green walls:a novel brewery wastewater treatmentoption[J].Environmental Technology,2023,44(18):2679-2692.

[36]QADIR M,DRECHSEL P,CISNEROS B J,et al.Global and regional potential of wastewater as a water,nutrient and energy source[J].Natural Resources Forum,2020,44(1):40-51.

[37]RADINGOANA M P,DUBE T,MAZVIMAVI D.Progress in greywater reuse for home gardening:opportunities,perceptions and challenges[J].Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C,2020,116:102853.

[38]王小江,何艺.垂直流人工湿地组合工艺在绿色建筑中的应用[J].中国给水排水,2013,29(16):40-43.

[39]成玉宁,王雪原.城市蓝绿空间融合规划的生态逻辑[J].中国园林,2023,39(10):39-43.

[40]GATTRINGER H,CLARET A,RADTKE M,et al.Novel vertical ecosystem for sustainable water treatment and reuse in tourist resorts[J].International Journal of Sustainable Development and Planning,2016,11(3):263-274.

[41]LIU W,ZHANG Y X,WANG S,et al.Effect of pore size distribution and amination on adsorption capacities of polymeric adsorbents[J].Molecules,2021,26(17):5267.

[42]PRADHAN S,HELAL M I,AL-GHAMDI S G,et al.Performance evaluation of various individual and mixed media for greywater treatment in vertical nature-based systems[J].Chemosphere,2020,245:125564.

[43]ABD-UR-REHMAN H M,PRODANOVIC V,DELETIC A,et al.Removal of hydrophilic,hydrophobic,and charged xenobiotic organic compounds from greywater using green wall media[J].Water Research,2023,242:120290.

[44]PRODANOVIC V,ZHANG K F,HATT B,et al.Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse[J].Building and Environment,2018,131:99-107.

[45]GALVÃO A,MARTINS D,RODRIGUES A,et al.Green walls with recycled filling media to treat greywater[J].Science of the Total Environment,2022,842:156748.

[46]ASCIONE F,DE MASI R F,MASTELLONE M,et al.Green walls,a critical review:knowledge gaps,design parameters,thermal performances and multi-criteria design approaches[J].Energies,2020,13(9):2296.

[47]DA CUNHA J A C,ARIAS C A,CARVALHO P,et al."WETWALL"—an innovative design concept for the treatment of wastewater at an urban scale[J].Desalination and Water Treatment,2018,109:205-220.

[48]SAMI M,HEDSTRÖM A,KVARNSTRÖM E,et al.Greywater treatment in a green wall using different filter materials and hydraulic loading rates[J].Journal of Environmental Management,2023,340:117998.

[49]BOANO F,COSTAMAGNA E,CARUSO A,et al.Evaluation of the influence of filter medium composition on treatment performances in an open-air green wall fed with greywater[J].Journal of Environmental Management,2021,300:113646.

[50]COSTAMAGNA E,CARUSO A,GALVÃO A,et al.Impact of biochar and graphene as additives on the treatment performances of a green wall fed with greywater[J].Water,2023,15(1):195.

[51]MANSO M,CASTRO-GOMES J.Green wall systems:a review of their characteristics[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,41:863-871.

[52]PANUVATVANICH A,KOOTTATEP T,KONÉ D.Hydraulic behaviour of vertical-flow constructed wetland under different operating conditions[J].Environmental Technology,2009,30(10):1031-1040.

[53]KOTSIA D,DELIGIANNI A,FYLLAS N M,et al.Converting treatment wetlands into "treatment gardens":use of ornamental plants for greywater treatment[J].Science of the Total Environment,2020,744:140889.

[54]LAKHO F H,QURESHI A,DE DONNO NOVELLI L,et al.Performance of a green wall (Total Value Wall™) at high greywater loading rates and Life Cycle Impact Assessment[J].Science of the Total Environment,2022,821:153470.

[55]EREGNO F,MOGES M,HEISTAD A.Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system:quantitative health risk assessment[J].Water,2017,9(7):454.

[56]ANDRIC I,KAMAL A,AL-GHAMDI S G.Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate:case study of Qatar[J].Energy Reports,2020,6:2476-2489.

[57]COSTAMAGNA E,FIORE S,BOANO F.Influence of the number of levels and system age on grey water treatment in a green wall[J].Ecological engineering,2022,183:106755.