

DOI: 10.5846/stxb201904020640

王志勇, 马静薇, 王立帅, 李琳, 吴珊珊. 校园再生水回用人工湿地景观绩效评价及优化设计建议——以辽宁公安司法管理干部学院为例. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Wang Z Y, Ma J W, Wang L S, Li L, Wu S S. Evaluation of landscape performance and design optimization proposal for a constructed wetland in an academic institution: Case study of Liaoning Administrators College of Police and Justice. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

校园再生水回用人工湿地景观绩效评价及优化设计建议

——以辽宁公安司法管理干部学院为例

王志勇^{2,3,*}, 马静薇^{1,4}, 王立帅¹, 李琳¹, 吴珊珊^{2,3}

1 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100871

2 北京大学景观设计学研究院, 北京 100871

3 北京土人城市规划设计股份有限公司, 北京 100080

4 南宁市建筑设计院, 南宁 530002

摘要:设计生态是相对于自然的生态而言的人工设计的生命与自然环境相互作用的系统,其是解决当代生态问题的新范式。从环境、社会、经济 3 个方面对辽宁公安司法管理干部学院人工湿地的设计生态的景观绩效进行了评价,主要得到以下结论:(1) 人工湿地能对回用再生水产生一定的净化作用。再生水经过人工湿地后,TP、TN、NH₃-N、COD、SS 分别减少 74.9%、6.66%、61%、41.18%和 64.71%,但整体水质类别保持不变。湿地基质土壤中 TN、TP 的含量与湿地水体有密切关系,再生水回用于人工湿地可以提高湿地基质中的土壤肥力。湿地周边植物生境类型为落叶阔叶林、灌木丛、草丛、浅水沼泽,其结构、优势种、下层植物差异明显。植物群落地域特征十分明显,整体多样性较为丰富,共计 22 科,37 属,37 种。(2) 人工湿地景观为校园师生提供了较好的游憩、社交和视觉景观服务,超过 80%的使用者对其总体评价在“满意”以上。同时,人工湿地运行、维护成本低,约每年可节约用水成本 6.7 万元。(3) 以提供生态系统服务为目标的景观在设计初期,应当全面考虑运行中的地域独特性,提高设计绩效的预见度。

关键词:设计生态;人工湿地;景观绩效;可持续景观设计;辽宁公安司法管理干部学院

Evaluation of landscape performance and design optimization proposal for a constructed wetland in an academic institution: Case study of Liaoning Administrators College of Police and Justice

WANG Zhiyong^{2,3,*}, MA Jingwei^{1,4}, WANG Lishuai¹, LI Lin¹, WU Shanshan^{2,3}

1 College of Architecture and Landscape Architecture of Peking University, Beijing 100871, China

2 The Graduate School of Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China

3 Beijing Turen Urban Planning and Design Company Limited, Beijing 100080, China

4 Nanning Institute of Architecture Design, Nanning 530002, China

Abstract: Designed ecology is a new paradigm to address ecological challenges in the modern era. It involved a designed landscape system harvesting the interactions between humans and the nature. We evaluated the performance of a constructed wetland, a designed ecological landscape, in the Liaoning Administrators College of Police and Justice. The impacts of this

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401108);国家自然科学基金面上项目(51678002)

收稿日期:2019-04-02; **修订日期:**2019-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzy1023@foxmail.com

landscape on environment, society, and economy were as follows: (1) The constructed wetland purified the reclaimed water. The reduction ratio of total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen, chemical oxygen demand, and suspended solids was 74.9%, 6.66%, 61%, 41.18%, and 64.71%, respectively; however, the water grade wasn't improved. (2) A strong relationship between total phosphorus and total nitrogen concentrations was observed in wetland soil and wetland water, implying that the reclaimed water improved soil fertility. (3) The habitat types comprised broadleaved deciduous forest, bush, grass, and shallow swamp; variations in their structure, dominant species, and undergrowth plants were observed. Although the plant community revealed local characteristics, high biodiversity existed, which included 22 families, 37 genera, and 37 species. (4) The wetland landscape provided high-quality recreation as well as social and scenic benefits to people, as reflected in the survey results, with over 80% indicating 'satisfied'. At the same time, the wetland could save 67,000 Yuan every year with low management cost. Therefore, we recommend that ecological service proposals should incorporate the local characteristics in all future design considerations.

Key Words: designed ecology; constructed wetland; landscape performance; sustainable landscape; Liaoning Administrators College of Police and Justice

设计生态学是一种解决当代生态问题的新范式。它是相对于自然的生态而言,是人工的生态或人工设计的生命(包括人)与自然环境相互作用的系统,即景观设计及其规划的生态过程^[1]。它基于当代的自然环境而产生,当前,城市中的原生自然生态系统越来越少,当代的生态系统的调节和净化能力、生产、作为生物栖息地等功能都受到了严重的破坏。设计生态就是通过景观规划和设计的手段,主动创造出近乎自然或具有自然特征的人工环境^[2-4]。

设计生态连接了“设计”和“生态”^[5]。在这里,景观是设计遵循生态学原则而形成的空间,它是自然过程和人类活动的载体,承载了生态系统的演化过程以及多样化的人类活动^[6-7]。在设计生态中,景观作为“人工自然”中的生态介入形式和操作手段,使自然能够发挥水质净化、蓄洪防灾、增加生物多样性及复杂性等多种生态系统服务功能^[8-9]。

作为人类智慧的实践,景观的实际效益需要被明确地度量,这引出了景观绩效的发展。美国景观设计师协会(Landscape Architecture Foundation, LAF)将其定义为“衡量景观解决方案在实现其预设目标的同时,满足可持续性方面的效率的度量”^[10]。它以可持续发展为框架,以生态系统服务为理论基础,以系统化、严谨和可量化的方式为景观的设计提供科学反馈^[11]。

湿地被誉为“自然之肾”,对城市及居民具有多种生态系统服务功能和社会经济价值,包括,蓄滞雨洪、净化水质、抵御自然灾害、保持生物多样性、调节微气候、承载城市文化、美学价值、提供能源和原材料、提供休闲娱乐空间等^[12]。湿地被广泛地应用于城市生态系统的修复和构造当中,通过构造人工湿地,形成具备栖息地功能的“人工自然”,为城市生态系统功能和服务的修复提供基础^[13-14]。俞孔坚及其带领的土人景观在国内外开展了大量的整合人工湿地的设计生态实践,实现了西方学界许多还停留在理论阶段的想法^[15]。辽宁司法公安管理干部学院(以下简称为司法干校)是其较早开展的设计生态学实践项目,该项目充分利用校园的自然条件,设计建造了一个集蓄滞雨洪、水质净化、水资源循环利用、休闲娱乐等为一体的人工湿地景观。于2011年建成后,至今是为数不多的完全依据生态理念规划设计,并运行多年的校园景观项目。我国高校众多,校园生活污水的可持续利用是一个可以创新开拓的领域。目前,我国校园人工湿地的效益研究多集中在其对生活污水的水质净化上^[16-17],并且人工控制试验研究较多^[18-19],对具备环境、社会、经济多重效益的人工湿地的实际运行中的效益研究较少。司法干校人工湿地已建成多年,其与周边环境、使用者的生产生活方式已经融为一体,其规划设计的绩效评估既可以为我国此类校园项目提供具体可参照的设计经验,也可以为我国设计生态学领域的理论和实践提供完整的样本。因此,以司法干校人工湿地为研究对象,通过开展监测、问卷调查、访谈等方法,从环境、社会、经济效益三个方面对其景观绩效进行评价,以期对未来可持续的设计生态

项目提供参考。

1 校园及人工湿地的可持续特征

人工湿地是辽宁司法干校生态校园设计的一部分(图 1),包括节约水资源、充分尊重场地特点、减少对环境的破坏等^[20]。校园位于沈阳市棋盘山风景区辖域内,总面积 25.08 hm²,于 2011 年建成。现有教职工 364 人,在校生 4000 余人。校园总体地貌三山环抱,北高南低,最高点高程 92.2 m,最低点 57.1 m。校园中部地势较平缓,以缓坡和台地为主;东部和北部以山体为主。建设前场地内有大量生长良好的植被,包括北侧的杨树林带,西侧刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、榆树(*Ulmus pumila*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、云杉(*Picea asperata*)等树种组成的密林,以及成斑块状分布、以杨树为主的密林。建成后校园总体自西北向东南分为教学办公带、生态景观带和生活带三部分,位于中间的以人工湿地为核心的生态景观带既分隔又连接了两侧的教学办公带和生活带。

人工湿地的设计充分利用了校园中部原有自然冲沟南北间 35.1 m 的地形高差,建造出 25 个层级的生态化跌水坝,形成梯级表面流人工湿地,总长 600 m,面积 11500 m²。每级人工湿地的池底采用回填土夯实,用层叠枕木作为挡墙,挡墙下游堆垒自然水冲石,具体设计参数可见《海绵城市——理论与实践》^[21]。该人工湿地被用来汇集雨水和净化中水。校园生活污水被收集至学院南部谷底的中水处理站,通过管道和水泵提取到人工湿地源头和中部,形成水循环。湿地中的水同时用于校园其他部分的绿地灌溉。

人工湿地既是雨水收集和中水净化的设施,也是独特的水景观。设计还在冲沟沿线根据地形和水位的不同,种植了湿生植物和护坡植物。沿岸设置了游憩步道、休息平台等,为师生提供休憩、观景的空间,增强亲水性和滨水空间的景观层次。

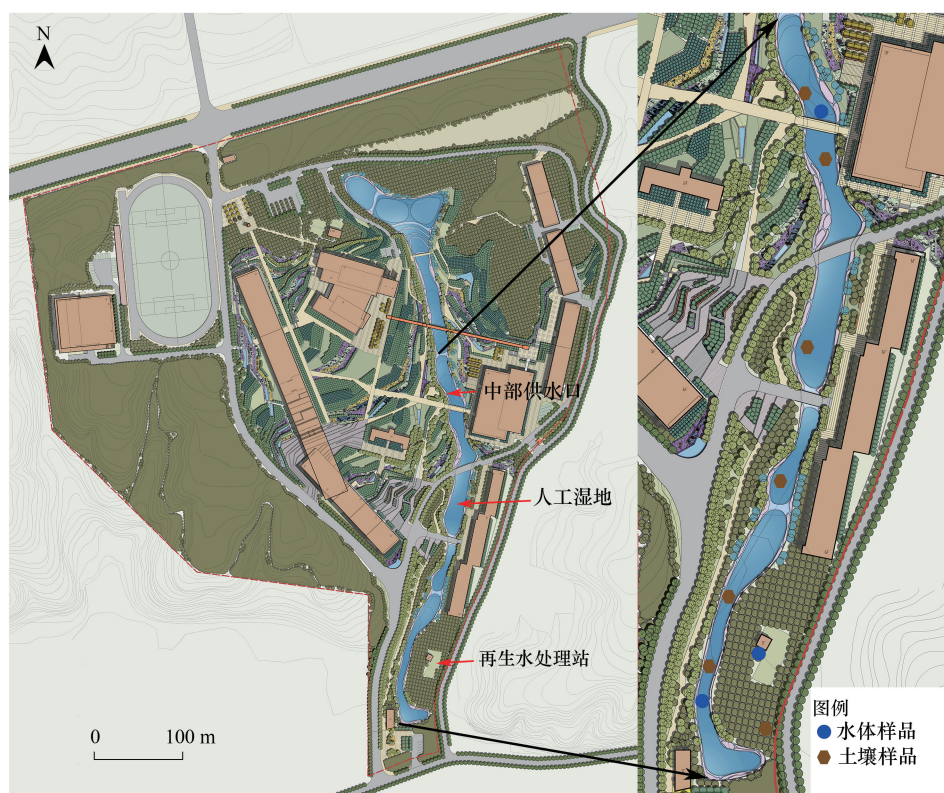


图 1 辽宁公安司法管理干部学院人工湿地及其下段

Fig.1 The constructed wetland and its lower part in Liaoning Administrators College of Police and Justice

2 数据与方法

2.1 水体样品采集及水质检测

于 2018 年 9 月在司法干校开展人工湿地水体样品采集。受施工影响,人工湿地上段停止补水,只有下段在运行。从中部水泵出水口处的湿地到末端共 7 个层级,末端湿地接收回用的再生水,中部水泵从该末端湿地提水至湿地中部,水流逐层流回末端,形成循环。分别收集污水处理站的出水(即再生水)、中部水泵的出水(即湿地入水)、倒数第二层级湿地出水口的出水(即末端出水),并检测总磷(Total Phosphorus, TP)、总氮(Total Nitrogen, TN)、氨氮(Ammonia Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)、化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)、悬浮物(Suspended Solids, SS)的含量。人工湿地各层级水体样品采集点位置见图 1。

2.2 土壤样品采集

对人工湿地水体样品采集的同时采集人工湿地的土壤样品,并检测总磷、总氮、全钾(Total potassium, TK)、有机质(Organic Matter, OM)的含量。沿人工湿地流向在各湿地底部采集土壤样品,各层级湿地采集 1 个,并在湿地附近不受再生水影响的区域采集土壤样品 1 个,共 7 个。土壤样品采集点位置见图 1。

2.3 植物物种调查

在采集水体、土壤样品的同时,对人工湿地周边进行植物样方调查。样本调查选取湿地周边非水域地区,随机分布 30 个样方,其中乔木灌木样方 10 个,每个 5 m×5 m,草本样方 20 个,每个 1 m×1 m,使样方的划分尽量涵盖多种生境类型。乔灌木样方调查中,记录植物物种的名称、胸径、树高、冠幅;草本层样方记录种名、占比等。各样方位置分布见图 2。

2.4 问卷调查、访谈及观察

采用问卷调查、访谈及观察评价人工湿地的社会效益。时间为 2014 年 9 月 22 日—25 日。

2.4.1 问卷调查法

根据人工湿地特征和使用者特征,调查人工湿地的植物景观、地形营造、道路、入口、灯光、水系等。使用者信息主要包括性别、年龄、职业、对人工湿地的使用方式。采用随机简单抽样,对象主要是学校里的学生和教职工。共发放并收回问卷 120 份,其中有效问卷 102 份。

2.4.2 访谈法

针对在问卷中难以体现的问题,对管理者进行访谈,更全面地了解人工湿地的运行和使用状况。访谈的主要问题包括:运行和维护的成本,使用中出现的问题和调整方案,所收集的水的去向等。

2.4.3 观察法

观察使用者的活动,包括活动的地点、活动类型和人数等信息。

3 结果与讨论

3.1 环境绩效

3.1.1 水质净化

按地表水环境质量标准(GB3838—2002)划分,回用再生水水质类别为劣 V 类(表 1)、中部水泵出水水质类别为劣 V 类,湿地末端出水水质类别仍为劣 V 类。3 种水体当中,TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的水质类别均为劣 V 类,再生水和湿地入水的 COD 的水质类别为 V 类,末端出水 COD 的水质类别为 III 类。再生水经过人工湿地净化后,总体水质仍为劣 V 类,但 COD 的水质类别提升至 III 类。

与再生水相比,湿地入水中 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、SS 分别减少 71.58%、56.97%、2.94% 和 41.18%(图 3),而湿地入水中 TN 的浓度比再生水中大。总体上,再生水排入人工湿地末端坑塘后污染物浓度有所减小,这主要跟末端坑塘中存在持续曝氧设施有关。

与再生水相比,湿地末端出水中 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、SS 分别减少 74.9%、6.66%、61%、41.18% 和 64.

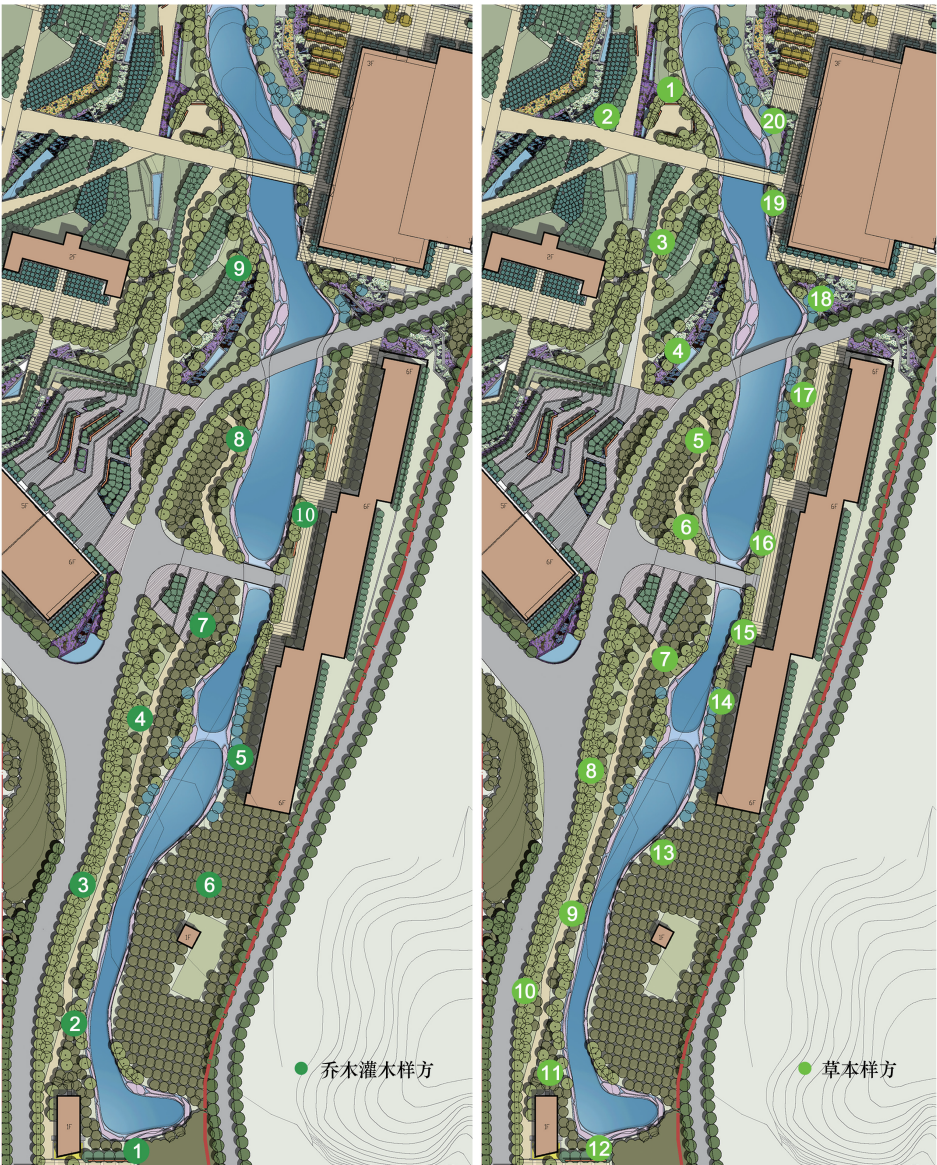


图 2 人工湿地下段植物样方分布位置

Fig.2 Location of plant quadrals in the lower part of the constructed wetland

71%。与湿地入水相比,湿地末端出水中 TP、TN、NH₃-N、COD、SS 分别减少 11.68%、48.79%、9.37%、39.39% 和 40%。人工湿地已普遍被认为能有效地净化生活污水,其净化效果受植物、碳源、基质、溶解氧和微生物等影响^[22-24]。在司法干校中,再生水经过人工湿地后,各污染物浓度均有所减少,但整体水质类别仍为劣 V 类。这与人工湿地流程较短,流速较快,而又有持续的再生水排入湿地有关,但人工湿地整体上是能提供一定的水质净化效益的。

表 1 人工湿地水质类别

Table 1 Water grades of the constructed wetland

样品 Samples	化学需氧量 COD	氨氮 NH ₃ -N	总磷 TP	总氮 TN
再生水 Reclaimed water	V	劣 V	劣 V	劣 V
湿地入水 water at the inlet	V	劣 V	劣 V	劣 V
末端出水 water at the outlet	III	劣 V	劣 V	劣 V

TP: 总磷 Total Phosphorus; TN: 总氮 Total Nitrogen; NH₃-N: 氨氮 Ammonia Nitrogen; COD: 化学需氧量 Chemical Oxygen Demand

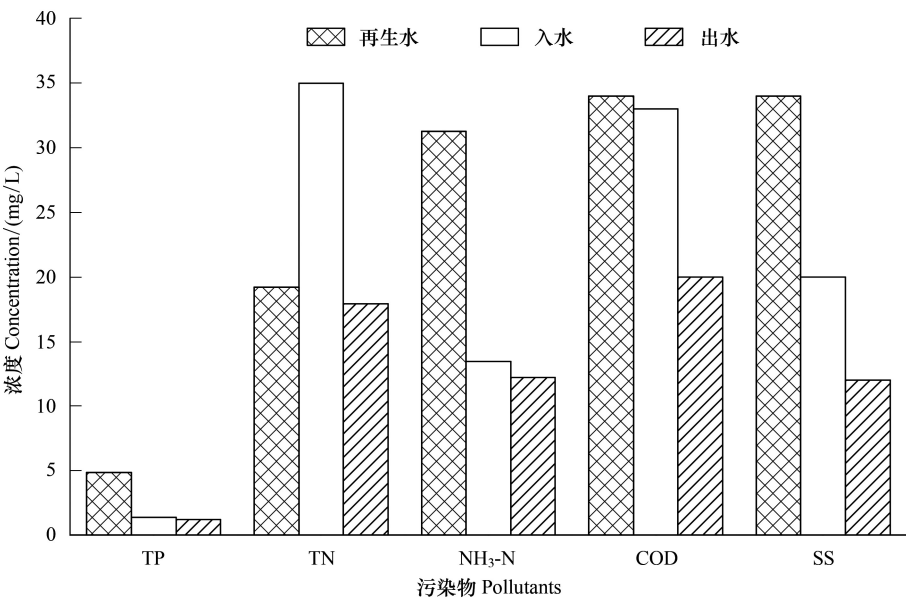


图3 人工湿地水样品的污染物浓度

Fig.3 Pollutants concentration of the water samples in the constructed wetland

TP: 总磷 Total Phosphorus; TN: 总氮 Total Nitrogen; NH₃-N: 氨氮 Ammonia Nitrogen; COD: 化学需氧量 Chemical Oxygen Demand; SS: 悬浮物 Suspended Solids

3.1.2 土壤肥力

按照全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,人工湿地周边不被再生水影响的土壤 OM 含量很高,属一级水平(表 2),TN 和 TK 的含量为四级,属中下水平;TP 含量为五级,属低水平。湿地基质中的土壤 OM 和 TN 含量较高,TP 和 TK 含量较低。湿地基质中土壤的 OM 含量也属于很高水平;TK 含量属于低水平。TP 和 TK 的含量在各层级坑塘中差异较大,TP 含量以低和中下水平为主,TN 以高和中上水平为主。

表 2 人工湿地土壤养分分级

Table 2 Soil nutrients grades of the constructed wetland

位置 Location	样品 Samples	总磷 TP	总氮 TN	全钾 TK	有机质 OM
湿地周边 Periphery of the wetland	1	五级	四级	四级	一级
湿地基质 Base of the wetland	1	五级	二级	五级	一级
	2	二级	一级	五级	一级
	3	四级	三级	五级	一级
	4	五级	三级	五级	一级
	5	五级	三级	五级	一级
	6	四级	三级	五级	一级

TK: 全钾 Total potassium; OM: 有机质 Organic Matter

除了 TK 以外,人工湿地各坑塘基质中的 TP、TN 和 OM 含量与湿地周边土壤中的含量接近或者较大(图 4)。再生水为经过处理的校园生活污水,污染物主要为 N(Nitrogen)、P(Phosphorus),湿地基质中的 N、P 含量相对湿地周边土壤较高,表明再生水回用于人工湿地后,增加了湿地基质土壤中的 N、P 含量。再生水灌溉既能直接增加 N、P、K(Potassium)、OM 等养分含量^[25-26],还能通过提高土壤酶活性,提高土壤微生物数量和活性,促进土壤水分保持来提升土壤肥力^[27-28]。再生水处理站每天为人工湿地提供再生水源,2011 年建成以来,持续的灌溉足以为湿地基质提供充足的养分,使湿地基质土壤具备较高的肥力。

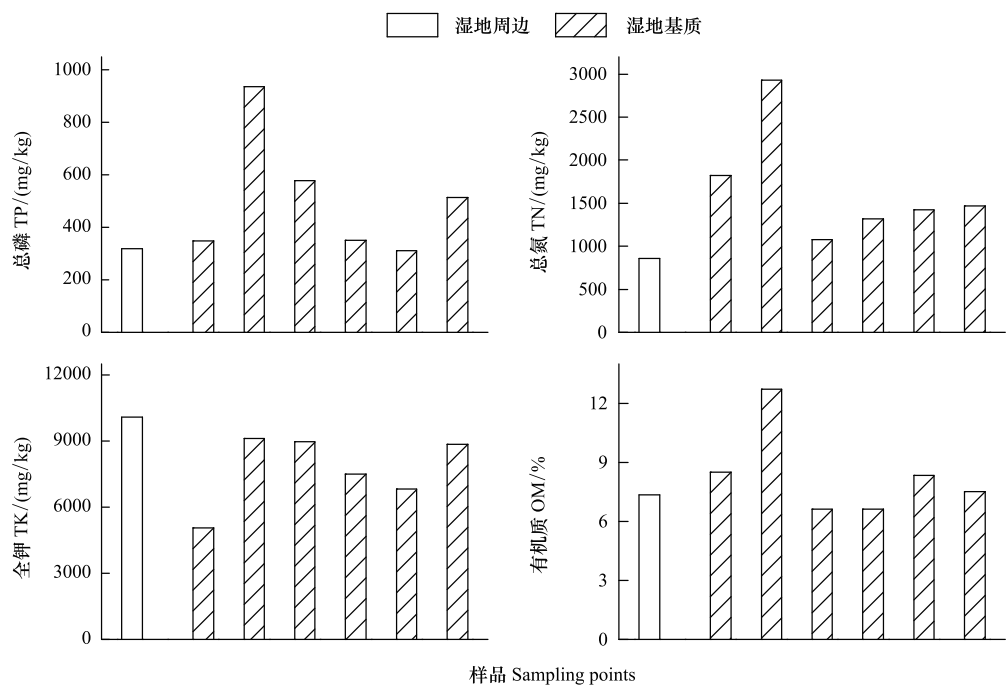


图 4 人工湿地土壤养分含量

Fig.4 Soil nutrients concentration of the constructed wetland

TK: 全钾 Total potassium; OM: 有机质 Organic Matter

3.1.3 植物多样性

依据土地利用类型和群落类型分类体系,对植物生境进行分类。通过走访、拍照,判定优势植物,并依据下垫面类型,将植物划分为 4 种生境类型——落叶阔叶林、灌木丛、草丛、浅水沼泽(图 5)。在此基础上,对每个生境类型的结构、优势种、下层植物进行分析,发现人工湿地周边不同生境的结构、优势种和下层植物等各有不同,差异明显(表 3)。

表 3 生境类型分析

Table 3 Analysis of the habitat types

生境类型 Habitat types	生境结构 Habitat structure	优势种 Dominant species	下层植物 Undergrowth species
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	以落叶阔叶树种为主,乔木层和草本层结合	毛白杨 (<i>Populus tomentosa</i>)、家榆 (<i>Ulmus pumila</i> L.)、刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) 等	刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)、暴马丁香 (<i>Syringa reticulata</i> var. <i>amurensis</i>) 等
灌木丛 Bush	灌木层和草本层结合	紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i> Linn.)、榆叶梅 (<i>Amygdalus triloba</i>) 等	水蜡 (<i>Ligustrum obtusifolium</i> Sieb.)、锦带花 (<i>Weigela florida</i> (Bunge) A. DC.) 等
草丛 Grass	无乔木层	地毯草 (<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) Beauv.)、菖蒲 (<i>Acorus calamus</i> L.)、葎草 (<i>Humulus scandens</i> (Lour.) Merr.)、堇菜 (<i>Viola verecunda</i>)、狗尾草 (<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.) 等	地黄 (<i>Rehmannia glutinosa</i>)、白屈菜 (<i>Chelidonium majus</i>)、苋菜 (<i>Amaranthus tricolor</i>)、白芷 (<i>Angelica dahurica</i>)、牛筋草 (<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.)、诸葛菜 (<i>Orychophragmus violaceus</i> (L.) O. E. Schulz)、苎草 (<i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino)、地肤 (<i>Kochia scoparia</i> (L.) Schrad.)、酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i> L.)、鸭跖草 (<i>Commelina communis</i>)、和尚菜 (<i>Adenocaulon himalaicum</i> Edgew.)、蒲公英 (<i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.)、牛膝菊 (<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.)、菱蒿 (<i>Artemisia selengensis</i> Turcz.)、紫苏 (<i>Perilla frutescens</i> (L.) Britt.)、翠菊 (<i>Callistephus chinensis</i> (L.) Nees)、一年蓬 (<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.) 等
浅水沼泽 Shallow swamp	湿地浅水区种植大量挺水植物	芦苇 (<i>Phragmites communis</i>) 等	-



图 5 人工湿地周边植物生境类型

Fig.5 Habitat types at the surround of the constructed wetland

人工湿地周边植物共计 22 科,37 属,37 种,主要群落结构为乔木层和草本层,植物群落地域特征十分明显。人工湿地周边植物整体多样性较为丰富,但乔木层由于大部分为人工种植,显示出相对较低的多样性(表 4)。主要植物种类为乡土物种,生长良好,为其他物种提供了良好的生境。很多植物种类为天然更新的草本和木本植物,显示出较好的生长趋势。

表 4 人工湿地样方植物 Shannon-wiener 指数
Table 4 Shannon-wiener index of the constructed wetland plants

植被类型 Plant types	香农-威纳指数 Shannon-wiener index				
乔木灌木 Arbor and bush	样方 1	样方 2	样方 3	样方 4	样方 5
	0	1	1	1	0
草本 Grass	样方 6	样方 7	样方 8	样方 9	样方 10
	1	1	2	1.58	0
	样方 1	样方 2	样方 3	样方 4	样方 5
	2.43	2.21	0.36	2.19	1.82
	样方 6	样方 7	样方 8	样方 9	样方 10
	2.66	0.92	1.14	2.15	2.01
	样方 11	样方 12	样方 13	样方 14	样方 15
	1.99	2.45	2.11	1.81	1.67
	样方 16	样方 17	样方 18	样方 19	样方 20
	2.79	1.97	2.23	1.85	3.03

人工湿地水体和土壤中的养分为湿地周边植物生长提供了充足的养分,对植物的生长有促进作用。许多研究都提出了相同的观点,如,美国环保署^[29]认为再生水中的养分水平要超过绿地乔灌植物所需的养分量,其中 N、P、K 等作为有用的营养元素,使用再生水可以促进植物生长,减少植物对肥料的需求。陈雁和李树华^[30]对 17 种园林植物用再生水和自来水灌溉对比发现,再生水能够提供园林植物生长必需的部分大量元素和微量元素,且可以被多数植物有效吸收,还可以促进一些植物开花,使花期提前。贾哲峰等^[31]对再生水灌溉绿地植物的影响进行综述后认为,再生水灌溉可以促进绿地植物的生长发育、改变生理特性、优化形态品质、增加矿质元素的吸收和增强综合抗性等优点。经过多年的生长演替,人工湿地周边的植物群落结构已经基本稳定,并且长势良好,可以认为再生水回用于人工湿地对促进周边植物生长,提高植物多样性起到了积极作用。

3.2 社会绩效

3.2.1 使用者状况

对 102 份有效问卷中使用者的总体特征进行了分析,主要包括职业、年龄及使用情况等方面(表 5)。(1) 人工湿地景观的使用者主要是学生,人数为 91 人,占有效问卷总人数的 89.22%,其次是教师,人数为 7 人,占比 6.86%。年龄多在 19—35 岁之间,占总人数的 88.24%。(2) 活动内容主要是散步和聊天,占比分别为 65.69%和 48.04%。(3) 学生与教师在工作日使用人工湿地景观的时段存在差异,53.85%的学生不定时使用,71.43%的教师 在 11:30—14:00 时段使用。(4) 大部分使用者停留时间较短,54.90%的使用者停留时间在 30 min 以内,28.43%的使用者停留时间在 30—60 min。

表 5 人工湿地景观使用者状况
Table 5 General situation of the constructed wetland users

特征 Characteristic	分类 Classification	人数 Number of people	占比 Ratio/%	特征 Characteristic	分类 Classification	人数 Number of people	占比 Ratio/%
性别 Gender	男	38	37.25	年龄 Age	18 岁及以下	9	8.82
	女	64	62.75		19—35 岁	90	88.24
职业 Profession	学生	91	89.22		36—60 岁	3	2.94
	教师	7	6.86		60 岁及以上	0	0
	工人	2	1.96	居住时长 Living term	1—3 年	44	43.14
	公司职员	1	0.98		1 个月以内	36	35.29
	自由职业	1	0.98		6—12 个月	10	9.8
	离退休人员	0	0		1—6 个月	7	6.86
活动类型 Activity types	散步	67	65.69	使用频率 Frequency of use	3 年以上	5	4.9
	聊天	49	48.04		每天	54	52.94
	闲坐	31	30.39		每周 3—4 次	22	21.57
	拍照	26	25.49		每周 1—2 次	19	18.63
	观景	21	20.59		每月 1—2 次	1	0.98
	其他	17	15.69		偶尔	4	3.92
	读书看报	4	3.92		总共 1—3 次	2	1.96
	考察	1	0.98		未使用	0	0
工作日活动时段 Activity time in weekday	不定时	52	50.98	休息日活动时段 Activity time in weekend	不定时	82	80.39
	8:00—11:30	14	13.73		8:00—11:30	7	6.86
	11:30—14:00	12	11.76		11:30—14:00	5	4.9
	18:30—20:00	12	11.76		6:00—8:00	3	2.94
	6:00—8:00	9	8.82		14:00—18:30	2	1.96
	14:00—18:30	3	2.94		18:30—20:00	2	1.96
	20:00 以后	0	0		20:00 以后	1	0.98
停留时间 Stop over time	30 min 以内	56	54.9	停留时间 e Stop over tim	1—2 h	14	13.72
	30—60 min	29	28.43		2 h 以上	3	2.94

3.2.2 使用者对人工湿地景观的满意度评价

人工湿地景观的评价包括植物种类、色彩、绿荫,地形营造,道路材质、宽度、路线,入口数量、分布,灯光数量、分布、亮度,以及水系景观、水质。

人工湿地周围原有的高大乔木被保留,建设过程中补植乔木和大量的野花,如山楂(*Crataegus pinnatifida* Bunge)、鼠李(*Rhamnus davurica* Pall.)、核桃(*Juglans regia* L.)、波斯菊(*Cosmos bipinnata* Cav.)、黑心金光菊(*Rudbeckia hirta*)、孔雀草(*Tagetes patula* L.)。85.3%的使用者对植物种类丰富程度“满意”,77.45%的使用者认为植物色彩“非常丰富”或“丰富”,96.7%的使用者认为绿荫“非常充足”或“充足”。

人工湿地原地形北高南低,高差较大,设计与建设中尽量保留并利用了原有地形。77.45%的使用者对地形营造“满意”。人工湿地改造自原场地的冲沟,跌落式的山塘、沟渠和溪流构成水景,同时具有滞蓄雨水和净化中水的功能。84.33%的使用者认为水系景观“非常好”或“好”,65.69%的使用者认为人工湿地的水质“非常好”或“好”。

使用者对人工湿地周边步行道路材质的认可程度较高,认为“非常合适”或“合适”的占 80.39%。人工湿地的入口分布位于北部、中部和南部,78.43%的使用者认为入口数量“非常充足”或“充足”,73.53%的使用者认为入口分布为“非常合适”或“合适”。灯光营造人工湿地的夜间景观,72.55%的使用者认为灯光数量“非常充足”或“充足”,74.51%的使用者认为灯光分布“非常合适”和“合适”,67.64%的使用者认为灯光亮度“非常合适”或“合适”。

总体上,使用者对人工湿地的各方面评价和总体评价均较高,80.39%的使用者对人工湿地总体评价为“非常满意”或“满意”,表明人工湿地为使用者提供了较好的游憩和社交、视觉景观服务。

3.3 经济绩效

人工湿地是校园的一部分,属社会公益项目,无直接的投入产出效益。其所带来的经济效益主要是与常规水景观相比,运行、维护和管理成本低。人工湿地每年可利用雨水和再生水共计 $10.38 \times 10^4 \text{ m}^3$,按设计建造时段居民生活用水价格计算同等水量的用水成本,约 18.7 万元。去除运行维护费用,约每年节约用水成本 6.7 万元。

4 设计优化建议

(1)人工湿地地下输水管道和水泵对人工湿地的运行具有关键性作用。每年 11 月中旬地表水开始结冰,至次年 3 月中旬开始解冻。受土壤温度影响,地下输水管道内直到 5 月初才能完全化冻。受该因素影响,人工湿地开始运行的时间延后,年均运行时间缩短。人工湿地管理者计划在地下输水管道增加竖井和水泵,以便在冬季地表水结冰前将管道内的水抽空,使人工湿地运行时间延长、处理中水的量增加、管道寿命延长,但该改造计划目前尚未实施。在项目初期全面考虑运行、管理和维护问题,整合分析、设计、管理和维护将有可使人工湿地的运行更高效。

(2)人工湿地周边缺少景观解说牌。景观解说牌是设计师与使用者间的沟通媒介,传达设计理念和景观内涵等知识。设计师有责任和义务帮助使用者提高景观审美水平。增加景观解说牌将有助于使用者理解场地和景观的含义,从单纯的美学欣赏转向更深刻的理解与认同,对人工湿地的设计和运行管理有更客观的评价,更好地实现人工湿地的教育功能。

(3)访谈中,了解到人工湿地在 2013 年 8 月 16 日的暴雨中全部被淹没,洪水从水体表面漫出。设计过程

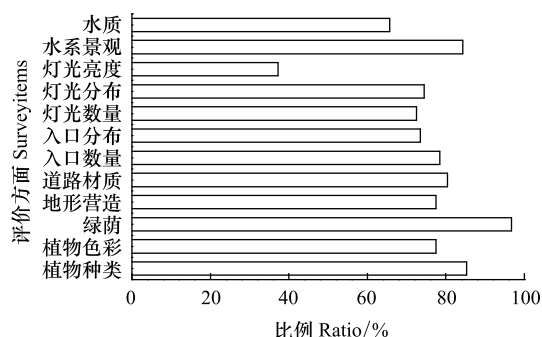


图 6 对人工湿地评价为“满意”以上的使用者所占的比例

Fig.6 Ratio of the users indicating 'satisfied'

应当结合现有的较高效的水文模型等手段,提高设计过程所采用的参数准确度。

5 结论

从环境、社会、经济 3 个方面对辽宁公安司法管理干部学院人工湿地的景观绩效进行了评价。景观绩效显示出了人工湿地在环境改善、公共活动支持等方面的生态系统服务价值,主要体现在以下几个方面:

(1) 水体、土壤样品以及植物样方调查的结果表明,人工湿地具有多重的环境效益,包括提高水质、提高土壤肥力、促进提高植物多样性。人工湿地净化再生水的过程也是再生水提高湿地基质土壤肥力的过程,同时也是为周边植物生长提供养分的过程。

人工湿地能对回收再利用的生活污水产生比较显著的净化作用。再生水经过人工湿地后,各污染物浓度均有所减少。与再生水相比,湿地末端出水中 TP、TN、NH₃-N、COD、SS 分别减少 74.9%、6.66%、61%、41.18% 和 64.71%,但整体水质类别没有变化。

湿地基质土壤中 TN、TP 的含量与湿地水体有密切关系,再生水回用于人工湿地可以增加湿地基质中的土壤养分含量,提高土壤肥力。

湿地周边植物生境类型为落叶阔叶林、灌木丛、草丛、浅水沼泽,其结构、优势种、下层植物差异明显。人工湿地周边植物共计 22 科,37 属,37 种,主要群落结构为乔木层和草本层,植物群落地域特征十分明显,整体多样性较为丰富。

(2) 人工湿地塑造的景观也为校园师生提供了较好的游憩和社交、视觉景观服务。使用者对人工湿地的各方面评价和总体评价均较高,超过 80% 的使用者对人工湿地的总体评价在“满意”以上。同时,人工湿地运行、维护成本低,约每年可节约用水成本 6.7 万元。

(3) 以提供生态系统服务功能为目标的景观在设计初期,应当全面考虑运行、维护和管理方面的地域独特性,计算出更准确的设计参数,提高设计绩效的预见度。

参考文献(References):

- [1] 景观中国. 2011 北京大学建筑与景观设计学院国际论坛: 设计的生态. [2019-04-02]. <http://beta.landscape.cn/special/2011bimu/index.html>.
- [2] 翟俊. 虽由人作, 宛自天开——走向人工自然的城市园林绿地新范式//中国风景园林学会 2013 年论文集(下册). 武汉: 中国风景园林学会, 2013.
- [3] 郑曦, 张凌. 基于自然过程的人工干预下的水系统生态设计. 景观设计学, 2013, 1(4): 78-82.
- [4] 张韬, 迈克尔·格罗福. 景观设计语境下的思考: 设计、生态、韧性研究的交汇. 王胤瑜, 张晶蕊, 译. 景观设计学, 2018, 6(4): 54-62.
- [5] Felson A J, Pickett S T A. Designed experiments: new approaches to studying urban ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(10): 549-556.
- [6] Ross M R V, Bernhardt E S, Doyle M W, Heffernan J B. Designer ecosystems: incorporating design approaches into applied ecology. *Annual Review of Environment and Resources*, 2015, 40: 419-443.
- [7] 杨沛儒. 生态城市主义: 5 种设计维度. 世界建筑, 2010, (1): 22-27.
- [8] 俞孔坚, 王向荣, 朱育帆, 庞伟. 景观四人谈 15 年思想与实践的历史. 城市环境设计, 2013, 71(5): 100-107.
- [9] 俞孔坚. 人类世生态系统与生态修复. 萨拉·雅各布斯, 译. 景观设计学, 2016, 4(1): 4-9.
- [10] Landscape Architecture Foundation. 2010-2014. Landscape performance series. [2019-04-02]. <https://lafoundation.org/research/landscape-performance-series/>.
- [11] Luo Y. Enhancing Quantification of a Landscape Project's Environmental, Economic and Social Benefits: A Study of Landscape Architecture Foundation's Landscape Performance Series[D]. Texas: Texas A&M University, 2014.
- [12] 俞孔坚, 李迪华. 城市景观之路——与市长们交流. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [13] 李明翰, 布鲁斯·德沃夏克, 罗毅, 马特·鲍姆加登. 景观绩效: 湿地治理系统和自然化景观的量化效益与经验总结. 苏博, 译. 景观设计学, 2013, 1(4): 56-68.
- [14] 刘洁. 设计生态学的景观绩效实证研究——以天津桥园公园盐碱地改善为例. 景观设计学, 2019, 7(1): 68-81.
- [15] 威廉·S·桑德斯. 设计生态学: 俞孔坚的景观. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [16] 刘超, 杨永哲, 宛娜. 新型人工湿地处理校园生活污水的运行特性. 中国给水排水, 2012, 28(17): 33-35.

- [17] 焦盈盈. 校园人工湖湿地净化水质试验研究. 给水排水, 2014, 40(S1): 79-81.
- [18] 刘文博. 校园人工湿地景观功能复合性研究——以西农人工湖湿地景观为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [19] 刘超. 新型多级垂直潜流人工湿地开发及其在分散型校园生活污水处理中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [20] 俞孔坚, 张慧勇, 文航舰. 生态校园的综合设计理念与实践——辽宁公安司法管理干部学院新校区设计. 建筑学报, 2012, (3): 13-19.
- [21] 俞孔坚. 海绵城市——理论与实践(下). 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [22] 丁怡, 王玮, 宋新山, 王宇晖. 人工湿地在水质净化中的应用及研究进展. 工业水处理, 2017, 37(3): 6-10.
- [23] 徐斌, 陈翔, 武周虎, 李修岭. 表流人工湿地 COD 去除影响因素研究. 绿色科技, 2017, (8): 28-31.
- [24] 黄勇, 董运常, 罗伟聪, 严过房, 汪晓丽, 罗倩. 人工湿地基质类型及其去污能力的影响因素. 贵州农业科学, 2018, 46(1): 137-142.
- [25] Xu J, Wu L S, Chang A C, Zhang Y. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils; a preliminary assessment. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 780-786.
- [26] 马莉, 谢晓蓉, 刘铁军, 刘译错, 杨有俊, 刘金荣. 兰州地区再生水灌溉对冷季型草坪草土壤养分的影响. 草业科学, 2015, 32(2): 182-187.
- [27] 郭魏, 齐学斌, 李中阳, 李平. 不同施氮水平下再生水灌溉对土壤微环境的影响. 水土保持学报, 2015, 29(3): 311-315, 319-319.
- [28] 李竞, 马红霞, 郑恩峰. 再生水灌溉对园林植物叶片生理及根际土壤特性的影响. 水土保持研究, 2017, 24(4): 70-76.
- [29] EPA (United States Environmental Protection Agency). EPA/625/R-04-108 Guidelines for water reuse. Washington, DC: EPA, 2004.
- [30] 陈雁, 李树华. 再生水对园林植物生长影响的研究. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 98-101.
- [31] 贾哲峰, 周海峰, 常智慧. 再生水灌溉对绿地植物影响的研究进展. 草业学报, 2012, 21(4): 300-306.