

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.02.005

细数植物在人工湿地污水处理中的作用

Jan Vymazal^{1,2}, 卫 婷^{3,4}, 赵亚乾^{2,3,5}, Ülo Mander^{2,6}, Florent Chazarenc^{2,7},
刘然彬⁸, 周敏伟²

(1. 捷克生命科学大学 环境科学学院, 捷克; 2. 江苏河马井股份公司 中欧人工湿地技术研发中心, 江苏 常州 213164; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 西班牙阿尔卡拉大学 化学工程系, 西班牙; 5. 爱尔兰都柏林大学土木工程系 Dooge 水研究中心, 爱尔兰; 6. 爱沙尼亚塔尔图大学 地理系, 爱沙尼亚; 7. 法国国家环境与农业科学技术研究院, 法国; 8. 北京建筑大学 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 天然的湿地植物在形态和解剖学上均能适应氧含量较低的生态环境, 因此, 它们可用于人工湿地系统中处理污水。而人工湿地中的植物不仅将人工湿地与稳定塘区分开, 同时为污染物的去除创造适合的条件。人工湿地中的植物不仅能减弱强光与风力对湿地的影响, 为湿地基质提供保温作用, 满足根区微生物生长对氧气和其他营养成分的需求, 还能截留部分污染物预防湿地堵塞, 并具有其特有的美学价值, 在不同类型的人工湿地中发挥不同程度的作用。最常见的人工湿地植物有漂浮植物如凤眼莲、浮萍; 沉水植物如狐尾藻属、金鱼藻属; 挺水植物如芦苇、香蒲属。而国内人工湿地除了以上这些常见植物外, 还常用一些其他的沉水植物, 比如芦竹、再力花、风车草以及美人蕉等。

关键词: 人工湿地; 水生植物; 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)02-0025-06

Counting the Roles of Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment

Jan Vymazal^{1,2}, WEI Ting^{3,4}, ZHAO Ya-qian^{2,3,5}, Ülo Mander^{2,6}, Florent Chazarenc^{2,7},
LIU Ran-bin⁸, ZHOU Min-wei²

(1. Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic; 2. Sino-European R & D Centre for Constructed Wetland Technology, Jiangsu HiPPO Plastics Co. Ltd., Changzhou 213164, China; 3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Chemical Engineering Department, University of Alcalá, Spain; 5. Dooge Centre for Water Resources Research, School of Civil Engineering, University College Dublin, Ireland; 6. Department of Geography, Tartu University, Estonia; 7. Centre INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhone-Alpes, France; 8. Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Wetland plants can morphologically and anatomically adapt to the ecological environment with reduced oxygen conditions and therefore, they can be used in constructed wetlands (CWs) for wastewater treatment. The presence of plants distinguishes CWs from stabilization ponds where plants are not intentionally planted. The plants are important for the treatment process as they

provide many roles and create suitable conditions for removal of pollution. The most important roles include insulation of the filtration bed, light and wind attenuation, provision of oxygen to the rhizosphere, nutrient uptake, clogging prevention and aesthetic value. These roles are applicable to various extents depending on the type of CWs. The most common plants used in CWs are free floating *Eichhornia crassipes* and *Lemna* spp., submerged *Myriophyllum* spp. and *Ceratophyllum* spp., and emergent *Phragmites australis* and *Typha* spp. These plants are used in China but other emergent species such as *Arundo donax*, *Thalia dealbata*, *Cyperus alternifolius* or *Canna indica* are also commonly used.

Key words: constructed wetland; macrophytes; wastewater treatment

1 湿地植物概述

湿地植物根据生活形态不同可分为4种:挺水、漂浮、浮叶根生和沉水植物。从形态学上看湿地植物适于生长在水体底泥中,一方面由于其具有庞大的根系,因而能借助发达的通气组织向根和根茎输送氧气,输送至根系的部分氧气在周围缺氧的环境中创造了氧化条件,从而促进了有机物的分解以及硝化细菌的生长;另一方面由于植物本身的形态、物理和行为特性及其可再生性等特点,均使植物适合在缺氧/厌氧的土壤和沉积物中生长。

漂浮植物极具多样性,无论从其形态还是生长环境来看,不同种类之间的差异非常大。有的漂浮植物植株高大,枝叶丛生呈莲状或漂浮在水面且根系于水中非常发达,例如水葫芦;而有的漂浮植物却很简单,不管是漂在水面的枝叶还是长在水里的根部,从形态上均看起来非常短小,例如浮萍。自然条件下,漂浮植物喜欢生长于富含养分的流动水域^[1],它们从水中汲取养分后快速生长繁殖,非常容易覆盖整个水体表面,破坏水生态平衡,给水体带来灾难,因此它们在热带和亚热带地区也是臭名昭著的水生害草。

浮叶根生植物的根部或茎扎于水底底泥中,茎叶漂浮于水面。为适应风浪,其叶柄通常柔韧细长,长度可达3 m^[1]。水面上茎叶的寿命很短(30~50 d),因此到了生长季,水面上的枝叶一年会换4~8次。这些根茎的生物量相对较大,沉到水底使得水底有机物沉积速度加快,抬升湖底高度。

沉水植物生长在水面下大约10 m的透光区内,其植物体完全沉于水汽界面以下,根扎于底泥中。通常认为沉水植物从水底底泥中吸收营养物,但特别的是它们从水体中吸收磷源。很多沉水植物以二氧化碳作为主要的甚至唯一碳源,但也有研究显示,大量沉水植物在自然环境中可以利用HCO₃⁻作为

碳源。沉水植物在水下吸收CO₂,经过光合作用后释放出氧气,同时使得水中的化学成分被改变。

挺水植物是世界范围内最主要的湿地植物类型,它们的生长范围非常广,耐水深度为0.5~2 m甚至更多。其细胞壁含有的纤维素使其具有一定的韧性^[1]。挺水植物的根部从底泥中吸收营养物质后再传递给茎叶,待其生长季结束后,再将营养物质转移到根部,其上部的茎叶部分衰老后,腐殖质又浸入水中,营养物质重新回到水中或水底底泥。

2 植物在人工湿地中的作用

大型水生植物的存在是人工湿地最显著的特征之一,也是人工湿地有别于天然的土壤过滤器或泄湖的主要原因。植物本身所具有的许多性质与污染物的去除有着密切的联系,因此在设计人工湿地时,必须要考虑植物的部分。

在不同类型的湿地结构中植物所起的作用如表1所示,植物在人工湿地系统中的多重功能如图1所示。

表1 植物对不同类型人工湿地的作用

Tab. 1 Positive actions of plants in various types of constructed wetlands

项 目	潜流型(SSF)		自由表面流型(FWS)		
	水平流	垂直流	挺水型	漂浮型	沉水型
遮光作用			+	+	+
保温作用	+	+			
降低风速			+	+	+
摄取/储存营养物	+	+	+	+	+
过滤作用	+	+	+	+	+
产氧作用	+	+		+	+
释放有机物	+	+		+	
生物附着面			+	+	+
细菌附着面	+	+	+	+	+
预防堵塞		+			
美学价值	+	+	+	+	

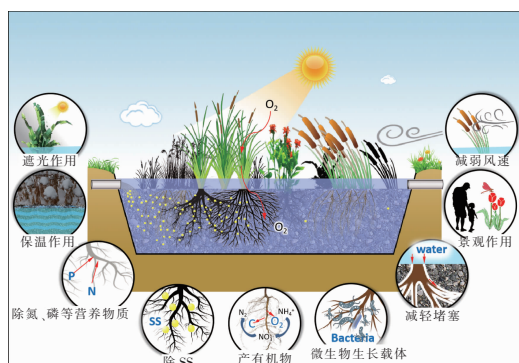


图 1 植物在人工湿地中的作用示意

Fig. 1 Schematic illustration of the roles of plants in CWs

2.1 遮光作用

对于自由表面流人工湿地来说,植物对光线的衰减起到了很大作用,而对潜流人工湿地的影响较小。浮游生物作为悬浮固体的指示生物,光线的减弱会抑制其生长,然而,浮游植物是水中氧气的主要生产者,因此光衰减抑制浮游植物生长的同时,也使得水中的含氧量降低。这一点尤其体现在自由表面流人工湿地中的凤眼莲(水葫芦)或浮萍属(浮萍)。

2.2 保温作用

在寒冷条件下,尤其是温带和寒冷气候的地区,植物对人工湿地滤床的保温作用非常明显^[2-3]。即使在北纬 68° 的挪威地区,同时利用植物和雪层,对人工湿地系统也会有很好的保温作用^[4]。一般在春天霜重或深秋时收割植物,收割后的湿地植物覆盖在湿地表面对其填料基质起到了保温效果。这样才能保证人工湿地全年时间对污染物去除效果和运行的稳定性。许多人研究了垂直流人工湿地一整年的处理性能,其中还包括对氨氮和总氮处理性能的研究,这些研究分别来自于瑞士^[5]、挪威^[4,6]、德国^[7]、捷克^[8]、美国^[2]和韩国^[3]。

2.3 减弱风速

种植密集的大型水生植物可以大幅降低湿地表面的风速。这种作用在垂直流人工湿地中尤为重要,因为它为悬浮固体的沉积创造了适宜条件,并防止其因为风吹再次悬浮,从而提高了悬浮固体的去除率。密集种植的漂浮植物如凤眼莲便可以达到类似的效果。

2.4 去除氮、磷等营养物质

湿地植物的成长和繁殖均需要营养物质,有根的大型水生植物主要靠根系来摄取营养。由于湿地

植物生长密集且生物量大,故其生物量中营养物质所占比重相当大^[9]。营养物质在特定隔室中的总储存称为“蕴藏量”,通常将植物组织中的营养物浓度乘以每单位面积的植物生物量进行计算,并以单位面积的质量(通常为 g/m^2 或 kg/hm^2)表示,计算植被中的养分积累量。人工湿地植物营养物质的蕴藏量与自然湿地相似^[10]。对于常见的芦苇和宽叶香蒲等体型高大的挺水植物来说,其地上部分的氮含量通常为 $30 \sim 50 \text{ g}/\text{m}^2$,磷含量通常为 $2 \sim 5 \text{ g}/\text{m}^2$ ^[10]。然而,植物体的地上营养物质蕴含量即使达到最高,但相对于每年流入人工湿地系统的市政污水的负荷量来说也是微不足道的,湿地植物的生物量中所整合的营养物质含量还不到进水氮负荷的 10%、磷负荷的 5%。Vymazal 和 Kröpfelová 的研究表明,水平流人工湿地进水的氮和磷年均负荷分别为 $1158 \text{ gN}/\text{m}^2$ 和 $262 \text{ gP}/\text{m}^2$ ^[10]。当然,在热带和亚热带地区,湿地植物每年可收割多次,通过多次收割植物便可以去除大部分的进水污染物负荷^[11]。在低负荷人工湿地中,植物本身整合所需要的营养物质便可以去除水中大部分负荷。如果湿地中碳源不足,那么植物生物量中的营养物质被分解再返回到水中。在地上生物量分解过程中,所释放的有机化合物可作为反硝化的碳源。特别是在低负荷人工湿地系统中,这种碳源也许就显得尤为重要。

2.5 去除悬浮固体

在水平流人工湿地中,较大粒径的悬浮固体会被大型挺水植物的茎叶过滤掉,而小粒径的悬浮固体则会附着在周丛生物(附着在水生植物体表或水底各种机制表面上的微型生物群落)或湿地基质的生物膜上^[12]。有些水平流人工湿地表面有漂浮植物,如凤眼莲或者可形成漂浮在水面上的草垫型挺水植物,这些漂浮植物密集根系便可过滤固体悬浮物^[13-14]。在潜流人工湿地系统中,当污(废)水从植物根部流过时,根系会过滤其中的悬浮固体。

2.6 产氧作用

由于水面以下的湿地基质中缺乏氧气,生长在基质中的植物的根和根茎必须通过植物体的气腔从其空中器官获得氧气。从解剖学上看,湿地植物的主要特征就是其具有发达的气腔组织,即“通气组织”。在植物的叶、茎、根部等不同部位,都有通气组织的存在,约占植物总组织体积的 60%。湿地植物的生长形态本身倾向于尽量减少根际的氧气损

失,但是根部的通气组织仍然会从根部释放氧气。在一些文献中,已经给出了不同植物的氧释放速率,芦苇属植物为 $0.02 \sim 12 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,沉水植物为 $0.5 \sim 5.2 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,漂浮植物为 $0.25 \sim 9.6 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[10]。氧气的释放范围主要由物种差异、季节变化以及研究中使用的不同实验技术共同决定。但是,可氧化区域却仅限于与根相邻的薄土壤层中。

2.7 分泌有机物

植物的根系不仅能释放氧气,还能产生一些其他物质。常见的为有机化合物,例如厌氧代谢产物、有机酸、植物营养素、肽(植物螯合素)、生物碱以及酚类、萜类化合物和类固醇^[15]。这些物质具体能释放出多少的比例至今还未有研究结果,但有报告给出了大致范围,通常在光合固定碳的5%~25%以内。由植物根系产生的这种有机碳可以作为脱氮剂的碳源,从而增加硝酸盐去除效果。虽然根系产物有很多种类和功能,但是在人工湿地污水处理系统中最重要的是抗菌化合物,例如单宁酸和没食子酸的释放以及参与重金属循环与去除的植物营养素和植物螯合素^[15]。

2.8 用作微生物生长载体

大型水生植物浸没在水下的茎和叶为生物膜的形成提供了巨大的表面积。沉水植物的组织为固着生物如光合藻类、细菌和原生动物提供生长载体^[16-17]。一方面,藻类可氧化水体吸收营养物质,细菌分解有机物;而另一方面,由于植物组织上聚集了大量其他生物,这些密集的生物可能会吸收光合有效辐射,导致植物叶子表面缺乏光照作用,从而限制了沉水植物的生长,甚至导致植物生长衰退。

2.9 为细菌生长提供底物

许多研究都表明,植物的根际具有多种多样的细菌生物,通常认为种植植物的湿地比未种植植物的湿地优良,主要是因为植物根系会促进微生物群落发展^[18]。有人提出生长在植物根系表面的微生物,通过利用根系分泌物的碳化合物和根系释放的氧,从而提高其数量及生物活性。有研究指出,植物根系比表面积不同,其细菌微生物密度也随之变化。在种植植物的湿地系统中,微生物密度明显大于未种植植物的湿地系统^[18-20]。Paul等^[21]研究了植物对特定根际其他生物群体的影响,其中与根部距离1 mm内的细菌总数通常比根系表面的高10倍。

2.10 减轻堵塞

潜流人工湿地系统在处理污水过程中,堵塞是不可避免的问题。悬浮固体的沉淀、系统中形成的生物膜沉淀、好氧区氢氧化物沉淀及厌氧区碳酸盐和硫化物等均是造成堵塞问题的原因。在早期的研究中,有人提出植物根系的生长会提高水力传导性,但该假设并未得到证实。在垂直流人工湿地中,通常污(废)水首先流入湿地表面,而大型水生植物的存在有助于防止堵塞。植物在风力作用下,其茎叶会打开细孔,在渗透污水的同时过滤悬浮固体,从而减轻堵塞问题。

2.11 美学价值

近年来,随着人工湿地污水处理系统在世界范围内的广泛应用,湿地植物的美学价值也得到了广泛认可。长期以来,在景观设计师眼中,湿地植物和水或废水组成的系统是城市景观设计和开发中可利用的绝佳元素^[22]。如果能更好地利用湿地植物,将会是美学上又一美好的景观。如今,利用湿地植物进行城市景观设计的成功案例越来越多^[23-24]。

3 大型水生植物在人工湿地系统中的应用

在水平流人工湿地中,芦苇、香蒲类、水葱类是目前世界范围内应用最多的植物^[25],但在某些地区,如美国、新西兰和澳大利亚,这几种植物属于非本地的入侵物种,因此不推荐甚至禁止在人工湿地中应用。对于垂直流人工湿地的植物来说,芦苇几乎成为欧洲地区的专用。在中国,不管是水平流还是垂直流的人工湿地,常见的湿地植物有芦苇、美人蕉、再力花、风车草、芦竹、芒草、香根草等。

香蒲和水葱是北美洲和大洋洲水平流人工湿地中最常用的挺水植物,而在欧洲和亚洲,水平流人工湿地植物最常用的是香蒲和芦苇。其他常见的植物还有灯芯草类和荸荠类的植物,这两种在北美洲和大洋洲更多一些^[26]。

水葫芦、水茭苳和浮萍类植物是人工湿地中最常见的漂浮植物,但水葫芦和水茭苳只存在于亚热带和热带地区。与其他类型植物相比,沉水植物在人工湿地中的应用则较少,因此不属于常用物种。也有些用到的沉水植物,基本属于狐尾藻类(欧亚水蓴草)、金鱼藻类(益气草)和茨藻类(孔雀草)。

4 植物对人工湿地污水处理系统的影响

尽管人工湿地污水处理技术已有50多年,但是利用湿地植物的生物量处理污水的尝试仍然非常稀

缺,其主要原因有:①植物的生长通常具有季节性;②植物生物量太小,不足以支持全年的系统运行。

一般来说,许多发展中国家在设计人工湿地污水处理系统时,除了想要达成污(废)水处理的目的外,还想寻求其他用途,在此种情况下便会尝试使用湿地植物。例如,Zurita等^[27]在墨西哥的一个水平流人工湿地试点工程中,使用了马蹄莲、鹤眼鹤、安祖花和非洲凤葵,使得湿地具有了观赏的商业价值。该作者得出结论,在人工湿地中种植这些植物,不会降低系统的处理效果。此外,Brix等^[17]在人工湿地中应用了泰国花卉市场上的植物龙虾爪和美人蕉。

在温带地区和北方地带,在人工湿地种植的大型水生植物如香蒲和芦苇,可作为生态型建筑材料。Maddison等^[28]研究了由香蒲、芦苇碎片以及棉纤维混合的一种黏土,具有很好的吸湿和解吸能力。原先的黏土吸收空气中的水分比较慢,而石膏墙板吸水则需要更多的时间,但添加了植物油就能减少黏土砂膏的质量,从而起到了加速吸湿的作用。

粗略的计算表明,1 hm²的人工湿地每年可以收割大量的植物[植物可收割的生物量(干质量)为0.30~1.76 kg/m²],最多可提供3户住宅的房屋隔热材料。若是收割香蒲,则其纤维材料可用于25栋房屋;若是芦苇,则可作为两幢房屋的茅屋顶原材料和3座房屋的隔热板材料。然而,由于重金属积累在香蒲根和根茎中,因此收割水面以上的植物部分不能从湿地中去除较多的重金属。

5 结论

植物是人工湿地污水处理系统的标志特征,在处理污水的过程中起许多重要作用。虽然植物的直接作用很小,但却间接创造了适合污染物去除的条件。植物的其他重要功能还包括对湿地基质的保温,对光和风的衰减,向根圈提供氧气,吸收水中过多的营养物质,防止基质堵塞并具有美学价值,这些功能根据人工湿地类型的不同发挥着不同的作用效果。世界范围内人工湿地中最常用的植物是芦苇和香蒲类植物,当然,这些植物在中国也是常用的湿地植物。此外,芦竹、再力花、马鞭草、美人蕉等这些种类的植物也常见于中国。

参考文献:

- [1] WETZEL R G. Limnology: Lake and River Ecosystems [M]. 3rd ed. California: Elsevier Academic Press,

2001.

- [2] DAHAB M F, SURAMPALLI R Y. Subsurface-flow constructed wetlands treatment in the plains: five years of experience[J]. Water Science and Technology, 2001, 44 (11/12): 375–380.
- [3] HAM J H, YOON C G, HWANG S J, *et al.* Seasonal performance of constructed wetland and winter storage pond for sewage treatment in Korea [J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A (Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering), 2004, 39(5): 1329–1343.
- [4] GLÆVER H M. Experience and results from the northernmost constructed wetland in Norway [M] // MANDER Ü, JENSSEN P. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates. UK: WIT Press, 2003: 215–235.
- [5] ZÜST B, SCHÖNBORN A. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climates: planted soil filter Schattweid – 13 years' experiences [M] // MANDER Ü, JENSSEN P. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates. UK: WIT Press, 2003: 53–68.
- [6] MÆHLUM T, JENSSEN P D. Design and performance of integrated subsurface flow wetlands in a cold climate [M] // MANDER Ü, JENSSEN P. Constructed Wetlands for Wastewater treatment in Cold Climates. UK: WIT Press, 2003: 69–86.
- [7] STEINMANN C R, WEINHART S, MELZER A. A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment [J]. Water Research, 2003, 37(9): 2035–2042.
- [8] VYMAZAL J. Horizontal sub-surface flow constructed wetlands Ondřejov and Spálené Poříčí in the Czech Republic – 15 years of operation [J]. Desalination, 2009, 246(1/3): 226–237.
- [9] BRIX H. Plants used in constructed wetlands and their functions [C] // ICN and INAG. Proceedings of Conference on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands. Portugal: ICN and INAG, 2003: 81–109.
- [10] VYMAZAL J, KRÖPFLOVÁ L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow [M]. Dordrecht: Springer Press, 2008.
- [11] OKURUT T O. Plant growth and nutrient uptake in a tropical constructed wetland [M] // VYMAZAL J. Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands. The Netherlands: Backhuys Publishers, 2001:

- 451–462.
- [12] ASHRAF S, NAVEED M, AFZAL M, *et al.* Unveiling the potential of novel macrophytes for the treatment of tannery effluent in vertical flow pilot constructed wetlands[J]. *Water*, 2020. DOI:10.3390/w12020549.
- [13] LEIVA A M, NUÑEZ R B, GÓMEZ G, *et al.* Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 116–125.
- [14] SMITH M P, KALIN M. Floating wetlands vegetation covers for suspended solids removal[M] // PRIES J. *Treatment Wetlands for Water Quality Improvement*. Ontario: CH2M Hill Canada Inc., 2002: 143–148.
- [15] NEORI A, REDDY K R, ČÍ SKOVÁ-KONCALOVÁ H, *et al.* Bioactive chemicals and biological–biochemical activities and their functions in rhizospheres of wetland plants[J]. *The Botanical Review*, 2000, 66: 350–378.
- [16] 易乃康, 彭开铭, 陆丽君, 等. 人工湿地植物对脱氮微生物活性的影响机制研究进展[J]. *水处理技术*, 2016, 42(4): 12–16.
- YI Naikang, PENG Kaiming, LU Lijun, *et al.* Research advances on the influence mechanism of wetland plants on microbial activity in nitrogen removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(4): 12–16 (in Chinese).
- [17] BRIX H, KOOTATEP T, FRYD O, *et al.* The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi – system design and lessons learned during implementation and operation [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(5): 729–735.
- [18] GAGNON V, CHAZARENC F, COMEAU Y, *et al.* Influence of macrophytes species on microbial density and activity in constructed wetlands[J]. *Water Science Technology*, 2007, 56(3): 249–254.
- [19] HATANO K, TRETTIN C C, HOUSE C H, *et al.* Microbial populations and decomposition activity in three subsurface flow constructed wetlands[M] // MOSHIRI G A. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Florida: CRC Press/Lewis Publishers, 1993: 541–547.
- [20] VYMAZAL J, OTTOVÁ V, BALCAROVÁ J, *et al.* Seasonal variation in fecal indicators removal in constructed wetlands with horizontal subsurface flow[M] // MANDER Ü, JENSSEN P. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates*. UK: WIT Press, 2003: 237–258.
- [21] PAUL E A, CLARK F E. *Soil Microbiology and Biochemistry*[M]. 2nd ed. California: Academic Press, 1996.
- [22] SANDOVAL L, MARÍN-MUÑIZ J L, ZAMORA-CASTRO S A, *et al.* Evaluation of wastewater treatment by microcosms of vertical subsurface wetlands in partially saturated conditions planted with ornamental plants and filled with mineral and plastic substrates [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2019. DOI:10.3390/ijerph16020167.
- [23] 刘然彬, 赵亚乾, 沈澄, 等. 人工湿地在“海绵城市”建设中的作用[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(24): 49–53, 58.
- LIU Ranbin, ZHAO Yaqian, SHEN Cheng, *et al.* Application of constructed wetlands to construction of sponge city[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(24): 49–53, 58 (in Chinese).
- [24] 伍业钢. 海绵城市设计: 理念、技术、案例[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.
- WU Yegang. *Sponge City Design: Concept, Technology & Case Study* [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2016 (in Chinese).
- [25] VYMAZAL J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 674: 133–156.
- [26] VYMAZAL J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 582–592.
- [27] ZURITA F, DE ANDA J, BELMONT M A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 861–869.
- [28] MADDISON M, MAURING T, KIRSIMÄE K, *et al.* The humidity buffer capacity of clay-sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(9): 1864–1868.

作者简介: Jan Vymazal (1955–), 男, 捷克人, 教授, 研究方向为人工湿地污水处理。

E-mail: tingwei93@163.com

收稿日期: 2020–03–23

修回日期: 2020–04–16

(编辑: 丁彩娟)