

2 种不同根系类型植物脱氮除磷对比研究

王伟亚, 张 静, 侯红勋, 张 辉

(中节能国祯环保科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 选取美人蕉和水芹 2 种植物类型不同的挺水植物为研究对象, 对其生长情况、脱氮除磷效果和植物贡献率进行研究。结果表明, 在实际污水中 2 种植物增长较模拟污水多, 美人蕉生物量较水芹增长多。2 种污水中 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果相当, 种植植物能明显强化脱氮除磷效果, 且美人蕉脱氮除磷能力强于水芹。实际污水经美人蕉处理后 TN 和 TP 最终浓度分别为 1.62 和 0.08 mg/L, 去除率为 88.14% 和 92.59%, 相应植物贡献率为 94.34% 和 97.34%; 经水芹处理后分别为 5.00 和 0.13 mg/L, 去除率为 65.18% 和 89.17%, 植物贡献率为 26.60% 和 76.82%。须根系的美人蕉吸收氮磷贡献率较直根系的水芹高, 在污水处理中应用更具优势。

关键词: 小试; 须根系; 直根系; 脱氮除磷; 植物贡献率

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010001

Research on nitrogen and phosphorus removal by two plants with different root systems

WANG Weiya, ZHANG Jing, HOU Hongxun, ZHANG Hui
(CECEP Guozhen Environmental Technology Co. Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Two emergent plants with different root types, Canna and Cress were selected as the research objects, and their growth, nitrogen and phosphorus removal effects and plant contribution rate were studied. Research showed that the growth of two plants in actual sewage was greater than that of simulated sewage, and the biomass of Canna was more than that of Cress. The removal effects of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in the two kinds of sewage were equivalent. Plants could enhance the effect of nitrogen and phosphorus removal, and the ability of Canna to remove nitrogen and phosphorus was stronger than that of Cress. The final concentrations of TN and TP in the actual wastewater after Canna treatment were 1.62 mg/L and 0.08 mg/L, respectively, the removal rates were 88.14% and 92.59%, and the plant contribution rates were 94.34% and 97.34%. After the Cress treatment, they were 5.00 mg/L and 0.13 mg/L, 65.18% and 89.17%, 26.60% and 76.82%. Canna with fibrous root system had a higher nitrogen and phosphorus contribution rate than Cress with straight root system. More advantages in sewage treatment and could be used first.

Keywords: small test; fibrous root system; tap root system; nitrogen and phosphorus removal; plant contribution rate

CLC number: X703.1

在植物浮床处理污水过程中, 植物根系起到至关重要的作用。植物根系具有释氧、释放根系分泌物、拦截、吸附和吸收污染物的能力^[1-5], 并与微生物协同作用达到污染物去除的效果。挺水植物根系发达, 茎秆粗壮、中空, 有发达的通气组织, 有利于氧在体内的传输并能传送到根区, 形成氧化态的微环境促进根区的氧化还原反应和好氧微生物的活动。植物根系分泌物可以促进某些嗜磷、氮细菌的生长, 从而间接提高净化率, 有植物的湿地系统

植物根部的细菌比介质处高 1~2 个数量级^[6]。成水平等^[7] 研究发现香蒲和灯心草的存在有利于微生物在人工湿地纵深的扩展。植物浮床中挺水植物根系悬浮在水中, 交织成良好的过滤网络, 根须之间拦截颗粒物质, 并且吸附和吸收溶解态污染物。

氮和磷作为植物营养元素, 同时是污水处理中主要的污染物, 植物根系类别的不同会影响植物强化脱氮除磷的效果。从植物营养学方面来说, 植物的根系类型不同, 它们吸收养分的效率就有一定差

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07602-001-002)

作者简介: 王伟亚(1991-), 女, 硕士、工程师。研究方向: 村镇污水和河道治理。E-mail: 3111823965@qq.com

引用格式: 王伟亚, 张 静, 侯红勋, 等. 2 种不同根系类型植物脱氮除磷对比研究[J]. 环境保护科学, 2022, 48(6): 110-115.

异。徐冰等^[8]通过研究内蒙古锡林河流域草原植物发现双子叶植物根系中氮磷比例(0.379)显著高于单子叶植物(0.192)。WERAGODA et al^[9]通过浮床实验认为根的粗细和密度影响植物根系参与污染物去除的作用。植物主要通过根系从介质中获得养分,因此介质和根系状况都影响养分的有效性。挺水植物大多为被子植物,被子植物分为单子叶和双子叶植物2类,他们不仅在子叶和叶脉上存在差异,根系结构也明显不同^[10]。单子叶植物的主根不够发达,在与根连接的茎基和茎节等处长出许多不定根,并形成大量粗细差不多的各级侧根,是粗细比较均匀的须根系,根长与表面积也都比较大。双子叶植物的侧根和主根都可进行次生长,形成粗细悬殊较大的不均匀的直根系结构。直根系在根长与总吸收面积上都小于须根系。然而,以往的实验研究大多进行单个植物间脱氮除磷能力的比较^[11-14],很少涉及植物根系类别的分析。

本研究通过模拟污水和实际污水分别培养美人蕉和水芹,探究污水中污染物去除效果,考察植物脱氮除磷贡献率和直根系、须根系对污染物的去除能力差异,以期为人工湿地或生物浮床的植物选择上提供新的支撑。

1 材料与方法

1.1 供试植物

美人蕉和水芹都是多年生水生植物,在生态环境治理工程中常作为生物塘和表流湿地、人工浮床的配置植物应用。美人蕉株高1~2 m,叶片长披针形,蓝绿色,总状花序顶生,多花,花径约10 cm呈黄色、红色或粉红色;生长适宜温度15~28℃,低于10℃不利于生长,是单子叶草本植物。水芹茎秆直立有棱,叶片为羽状复叶,互生,叶缘具齿;复伞形花序,顶生,花白色;性喜温凉环境,不耐高温和干旱,每年有2个生长高峰季节,分别为12月~次年4月和9~11月,生长对养分需求量较大,是双子叶草本植物。

1.2 实验方法

实验用水箱为PP材质,长×宽×高=75 cm×25 cm×50 cm,下部一侧开孔装有阀门便于放水,水箱共12组,每组设置3个平行实验,配置厚5 cm泡沫板,放置于采光通风良好的玻璃房内。选择美人蕉和水芹2种,分别种植在污水和模拟污水中,

同时设置不种植植物的污水空白组。根据实际污水特点,模拟污水中COD选用乙酸钠配制,采用尿素和氯化铵配制TN及NH₄⁺-N,磷酸二氢钾配制TP和PO₄³⁻-P。模拟污水和实际污水中污染物初始浓度范围为COD(37~43 mg/L),TN(11.7~13.6 mg/L),NH₄⁺-N(7.87~11.80 mg/L),TP(0.99~1.39 mg/L),PO₄³⁻-P(0.82~1.36 mg/L),pH 6.5~7.5。

将植株幼苗清洗干净,在自来水中培养1周后量取植株鲜重、茎长、根长、根数和根宽,选择2种植株各3棵进行植株干重及氮磷含量测定。每个植物处理组种植3棵相同植物植株,测量鲜重、根茎长度和根数。水箱用黑色塑料膜覆盖包裹四周,减少水中因光合作用生长的藻类对实验的影响。采水样2次/周,每次采集250 mL,采植物样1次/周,根据实验数据补充污水及模拟污水体积,持续进行5周。实验结束后选择每组生长良好的植株各3棵测量干重及氮磷含量。

1.3 数据处理

污染物去除率计算,见式(1):

$$\text{去除率} = \frac{V_1 \times C_0 - V_2 \times C_e}{V_1 \times C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C₀为污染物如TN、NH₄⁺-N、TP和PO₄³⁻-P的初始浓度值,mg/L; C_e为实验结束时污染物的最终浓度值,mg/L; V₁和V₂为水箱中水的初始和最终体积,L。分子表示水中污染物总去除量,mg。

植物累积氮或磷总量(mg)计算,见式(2):

$$\text{氮(磷)累积量(mg)} = \frac{m_2 \times \rho_2 - m_1 \times \rho_1}{1000} \quad (2)$$

式中: m₁为初始植物干重,g; m₂为最终植物干重,g; ρ₁、ρ₂为初始和最终氮或磷含量,mg/kg(干重)。

2 分析与讨论

2.1 根系和分蘖数、微生物、生物量增长

经测定,实验中pH在6.5~8之间,适合挺水植物生长。实验前后植物生长平均值汇总,见表1。

表1可知,实验结束时2种植物均有所生长,且茎基处分蘖出新枝和新根。水芹的生物量各项指标增加均比美人蕉增加较少,根数始终比美人蕉多但多为细小短须根。从植物根系角度分析,水芹是双子叶植物,根属于直根系,主要的主干根系都可以进行次生长,粗细悬殊较大不均匀,根长和

表面积都比较小;美人蕉是单子叶植物属须根系,主根不发达,有大量粗细差不多的各级侧根,根长和表面积都较大^[15]。

表 1 实验前后植物生长平均值

植物生长情况		M-水芹	M-美人蕉	W-水芹	W-美人蕉
茎长/cm	始	33	42	34	42
	末	45	66	48	64
根长/cm	始	8	8	10	12
	末	13	14	19	25
根数/个	始	47	14	55	17
	末	60	36	87	48
分蘖数/个	始	0	0	0	0
	末	7	7	7	8
鲜重/g	始	16.5	48.5	19.0	55
	末	49.0	135.0	58.5	189

注: M表示模拟污水, W表示实际污水。

2.2 氮去除情况分析

TN 的去除效果随时间变化情况, 见图 1。

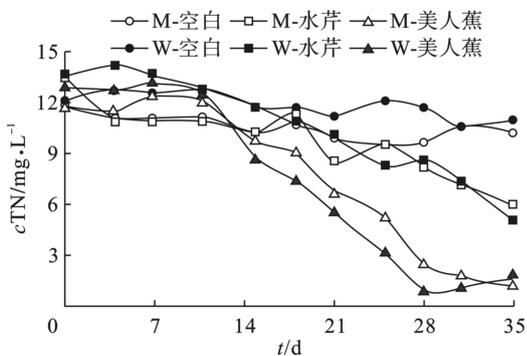


图 1 TN 去除效果

除空白对照组以外, TN 浓度均有所减少, 美人蕉组 TN 浓度降至最低。经过美人蕉处理后模拟污水 TN 浓度为 1.14 mg/L, 实际污水 TN 浓度为 1.62 mg/L, 水芹处理后模拟污水和实际污水 TN 浓度分别为 5.85 和 5.00 mg/L。从 3 方面分析原因: 首先, 种植植物后 TN 浓度较空白组明显下降, 主要是挺水植物对氮的吸收增强了 TN 的去除效果, 同时植物根系周围为微生物生存提供了好氧和缺氧环境, 加强了硝化反硝化脱氮^[16]。其次, 实验中美人蕉较水芹 TN 去除量多, 这与植物生长状况相对应, 实验中美人蕉生长较水芹显著占优势, 茎干挺拔, 根系

发达, 而水芹生长缓慢。最后, 同一植物处理组中模拟水和污水 TN 浓度相差较小, 说明实验中植物吸收去除 TN 发挥主要作用, 而不是污水中微生物反硝化脱氮。这可能是实验初始 COD 含量和植物根系分泌物较少^[17], 不能提供足够的碳源供反硝化细菌正常生长, 导致实验中微生物反硝化脱氮效果微弱。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果, 见图 2。

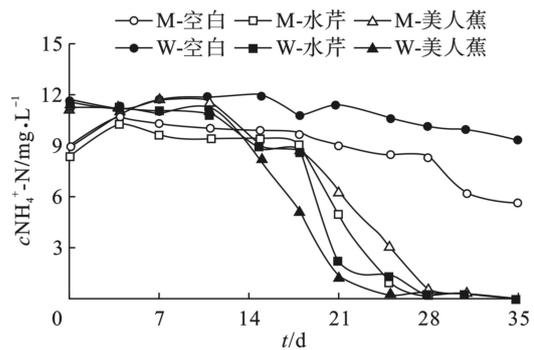


图 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果

模拟污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在第 1 周浓度平均升高了约 1.78 mg/L; 2 种污水中第 2 周 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度缓慢下降; 第 3 周和 4 周植物组浓度下降迅速, 空白组也呈下降趋势; 第 5 周植物组浓度降至最低, 空白组继续缓慢减少。最终, 经过水芹和美人蕉处理后模拟污水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 0.09 和 0.07 mg/L, 实际污水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 0.09 和 0.12 mg/L, 空白组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 5.63 和 9.36 mg/L。对比可见, 种植挺水植物有助于加快水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的几个原因如下: (1) 污水中氮的形态主要是有机氮和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 前期水中部分有机氮的氨化作用转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 使得浓度有所升高; (2) 在植物处理组, 植物根系吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为氮营养元素为生长养分, 根据动力学原理^[18] 可知反应速率与底物浓度呈正相关, 前期水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度迅速下降, 后期由于水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度太低植物根系的吸收也相应减弱, 浓度变化变缓; (3) 污水中微生物同样参与了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化去除, 植物根系将光合作用产生的氧气传递到根际周围, 为微生物创造有氧环境将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 而且由于植物根系的存在充当微生物附着载体, 植物组微生物较空白组多, 所以植物组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较好。2 种植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果无明显差异, 进一步证实本实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对于美

人蕉和水芹生长所需太低, 达不到奢侈吸收的程度^[19-20], 最终植物生物量增长不明显。

2.3 磷去除情况分析

不同处理组中 TP 的去除效果, 见图 3。

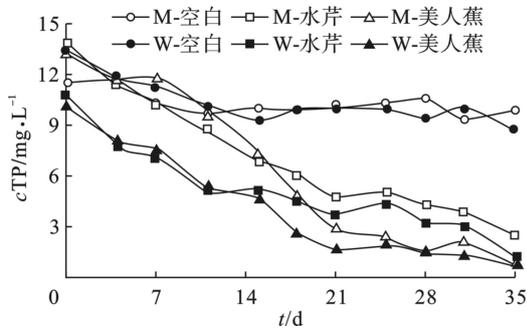


图 3 TP 去除效果

TP 浓度在不同处理组出现不同变化形式: 种植美人蕉和水芹的实验中 TP 浓度下降明显, 且美人蕉较水芹去除更多, 空白对照中 TP 浓度几乎不变。TP 初始浓度在 1.02 ~ 1.39 mg/L 范围内, 最终美人蕉处理模拟污水和实际污水中浓度分别为 0.07 和 0.08 mg/L。由此可见, 种植水生植物对 TP 的去除有较大影响。

PO₄³⁻-P 浓度随时间变化的情况, 见图 4。

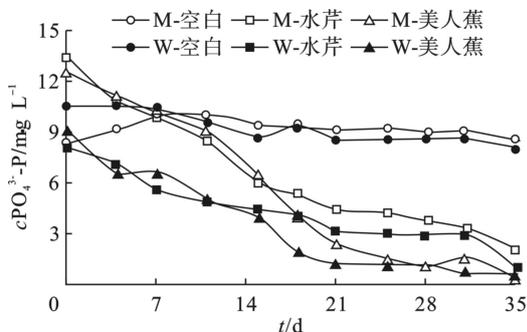


图 4 PO₄³⁻-P 去除效果

图 4 中 PO₄³⁻-P 与图 3 中 TP 相似的浓度变化曲线, 说明 TP 以水溶态磷酸根形式存在并被去除,

植物根系吸收 PO₄³⁻-P 并通过导管运往地上部, 参与体内代谢活动。另外, 可能也存在 PO₄³⁻-P 沉淀于水底而从水中去除的效果, 与模拟污水相比, 在污水空白组浓度也有所减少, 减少了 0.25 mg/L。实际污水取自污水处理厂过格栅进入沉砂池的污水, 含有部分颗粒物, 在颗粒物下沉过程中会吸附、络合磷酸根, 另外, 污水中携带的铁和铝等金属离子会与水溶态磷酸根结合形成难溶磷酸盐化合物同颗粒物一起下沉而去除部分 PO₄³⁻-P^[21]。总的来说, TP 的去除主要是通过植物吸收和沉淀作用, 这与葛铜岗等^[22]的串联式菖蒲浮床实验研究结果相似, 该研究认为植物吸收对水体氮磷去除的贡献度在串联浮床系统中呈空间分布规律。

2.4 氮磷去除率及植物贡献率分析

植物处理后 TN、TP 的去除率和植物氮磷去除贡献率, 见表 2。

模拟污水空白中 TN、TP 减少率分别为 20.06% 和 19.52%, 实际污水空白组分别为 14.73% 和 38.68%, 证明美人蕉和水芹的种植都明显提高了污水中 TN、TP 的去除, 并且不论是去除率还是植物贡献率的数值都表明美人蕉显然比水芹更适合浮床种植, TN 去除率分别增加了 31.99% 和 22.56%, TP 去除率分别增加了 12.43% 和 3.42%。同时, 表 2 中显示水芹的 TN 去除贡献率显著低于美人蕉, 仅 26.60% ~ 29.17%, 可能是实验中反硝化脱氮效率低, 水芹本身吸收积累的氮量少而导致 TN 去除率低。结合表 1 中植物生物量变化, 植物生物量越大吸收的氮磷越多, 植物脱氮除磷贡献率相应提高。如, 实际污水种植的美人蕉生物量增长最大, 其植物贡献率均超过 90%, 为所有实验中最大值。

表 2 氮磷去除率及植物贡献率

植物	氮				磷			
	去除率/%	去除量/mg	植物全氮量/mg	植物贡献率/%	去除率/%	去除量/mg	植物全磷量/mg	植物贡献率/%
M-水芹	58.77	354.38	103.37	29.17	82.95	51.70	34.392	66.52
M-美人蕉	90.76	475.80	361.74	76.03	95.38	57.09	44.070	77.19
W-水芹	65.18	397.46	105.71	26.60	89.17	43.74	33.600	76.82
W-美人蕉	88.14	511.65	482.67	94.34	92.59	42.50	41.370	97.34

美人蕉吸收贡献率占氮磷去除率均超过 75%, 是浮床实验的脱氮除磷主要途径; 水芹吸收是磷去

除的主要途径, 氮去除率较低, 对磷的贡献率分别为 66.52% 和 76.82%, 氮的贡献率分别为 29.17%

和 26.60%。总的来说, 实验中种植的美人蕉和水芹的氮磷去除效果, 除了水芹对氮的处理, 植物吸收均占主要作用, 反硝化脱氮和微生物吸磷作用效果较差, 而且须根系的美人蕉吸收作用更加明显。

2.5 讨论

根据叶创兴等^[23]的《植物学》可知, 水生植物的根系一般由主根、侧根和不定根等组成。主根是在种子萌发后首先生长出的向下垂直的根, 随着主根长到一定长度后会在主根上产生分枝状的侧根, 而不定根则是在茎的基部发出的根。单子叶植物对应的须根系植株, 主根在植株幼苗期吸收水分并起支撑作用, 但在不定根形成后就停止生长, 进而形成以主根为端点、周围辐射以须状侧根和不定根的庞大类似球状的根系结构。须根系不定根的数量巨大, 如, 一株成熟的黑麦草的根有 1 500 万条, 总长度能达到 640 km, 表面积相当于一个排球场面积, 具有强大的吸附能力。双子叶植物的根是直根系, 也称主根系, 主根和侧根在粗度和长度方面差异很大。直根系主次分明, 表现出发达的主根, 在主根周围分布着匍匐状的侧根和不定根, 表面积较须根系小。从根系特征分析, 美人蕉属于须根系, 水芹属于直根系。

从植物营养来看, 氮是植物生长必需的常量营养元素, 在植物细胞结构、新陈代谢和光合作用等生理活动中发挥重要作用, 通过植物根系从周围介质中摄取而来^[24]。然而, 植物根系只能吸收铵根、硝酸根等无机态氮和部分小分子氨基酸, 其他有机氮必须经过分解降解才能被植物吸收。根系不断从水中吸收氮素, 植物生物量不断增加, 水中 TN 浓度则逐渐较少。美人蕉的须根系根须在水中分布体积更大, 表面形成的生物膜相互之间影响较小, 能够更加有效地降解污染物; 相对来说, 水芹的根是直根系, 根与根之间孔隙较小, 容易形成厌氧空间, 污染物降解可能受到影响。和氮素一样, 磷素也是植物的必需常量元素, 在植物生长发育、新陈代谢等生理活动中发挥着不可替代的重要作用, 同时还参与植物细胞和组织、器官结构中的组成。植物根系对磷的吸收是主动吸收, 可逆浓度吸收, 需要消耗能量, 其吸收速率受磷在介质中浓度高低影响, 浓度越低吸收速率越低^[25]。另外, 须根系的美人蕉根系宽幅较直根系的水芹的根系宽幅大, 细而

长的根毛比表面积大能够吸收更大范围营养物, 生长速率更快, 生物量大, 因此 TP 去除效果更加明显。

3 结论

根系类型分别为须根系和直根系的美人蕉和水芹在污水中均能正常生长, 在复合生态处理中具有强化脱氮除磷的能力, 且美人蕉优于水芹。单子叶植物由于其须根系根部结构, 根系表面积大于双子叶植物的直根系, 且单子叶植物根系细且长, 形成错综复杂的根系网络, 能够吸收拦截较多营养元素, 同时为微生物创造更大的栖息场所, 较双子叶植物更有利于污染物的去除。所以, 在污水复合生态治理工程中可以优先考虑单子叶植物种植。由于条件受限, 本研究仅从水中污染物去除量方面分析认为单子叶植物的须根系较双子叶植物的直根系更适合污水复合生态治理, 对植物根系结构和微生物生长状态如生物量和生物种类等缺少微观分析, 后续将进一步从微观角度论证这一观点, 为生态修复提供充分的理论支撑。

参考文献

- [1] 汤苏晨, 程康睿. 根系结构对湿地植物根系释氧能力的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 112 - 116.
- [2] 王朋强, 吴义兰, 李永富, 等. 植物根系分泌物及微域环境的研究与展望[J]. 乡村科技, 2021, 12(27): 96 - 98.
- [3] KRISHNA K Y, NEHA G, AMIT K, et al. Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 274 - 298.
- [4] DI LUCA G A, MUFARREGGE M M, HADAD H R, et al. Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 650: 233 - 240.
- [5] 樊欢. 生态浮岛修复富营养化水体的实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [6] 张鸿, 吴振斌. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 1999, 33(4): 575 - 578.
- [7] 成水平, 夏宜争. 香蒲, 灯心草人工湿地的研究: III. 净化污水的机理[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 66 - 71.
- [8] 徐冰, 程雨曦, 甘慧洁, 等. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 29 - 38.
- [9] WERAGODA S K, JINADASA K B S N, ZHANG D Q, et al. Tropical application of floating treatment wetlands[J]. *Wetlands*, 2012, 32(5): 955 - 961.
- [10] 叶嘉, 丁金娥. 被子植物营养器官根、茎结构的比较教学[J]. 河北师范大学学报(教育科学版), 1998(3): 330 - 332.
- [11] 董怡华, 张新月, 陈峰, 等. 生态浮岛的构建及其修复校园富营

- 养化人工湖水试验[J]. *环境工程*, 2021, 39(3): 90-96.
- [12] 谌宏伟, 蔡雪璐, 杨欣怡, 等. 南方挺水植物净化城镇污水总磷的对比试验[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(增 2): 95-100.
- [13] 俞波, 黄荣振, 何圣兵. 不同植物类型表面流湿地处理低污染河水的效能研究[C]//北京: 环境工程 2018 年全国学术年会论文集(下册). 2018.
- [14] 洪瑜, 王英, 王芳, 等. 5 种浮床植物对宁夏引黄灌区稻田退水中氮磷的去除效果[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(11): 2637-2645.
- [15] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [16] 李彩霞. 人工湿地中植物脱氮除磷影响因素综述[J]. *吉林农业*, 2019(1): 110-111.
- [17] 刘雯, 丘锦荣, 卫泽斌, 等. 植物及其根系分泌物对污水净化效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(6): 971-976.
- [18] 张贵龙, 赵建宁, 刘红梅, 等. 不同水生植物对富营养化水体无机氮吸收动力学特征[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 221-226.
- [19] 李志伟. 氮磷过量对植物生长的影响及有机肥的调控作用[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
- [20] 苏苑君, 胡笑涛, 王文娥, 等. 磷对水培生菜生长及矿质元素动态吸收的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 34-42.
- [21] 任绵绵. 城市污水处理厂不同工段污水中磷的化学去除效果及污水化学除磷特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [22] 葛铜岗, 罗固源, 许晓毅, 等. 串联式菖蒲浮床去除污染河水氮磷的试验研究[J]. *三峡环境与生态*, 2010, 3(1): 5-7.
- [23] 叶创兴, 朱念德, 廖文波, 等. 植物学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [24] 胡春吉, 雷宁, 邹良平, 等. 植物中氮素利用及硝态氮转运蛋白的研究进展[J]. *分子植物育种*, 2016, 14(8): 2188-2196.
- [25] 宋海亮, 吕锡武, 李先宁, 等. 氮磷在阶式水生植物床中的去除效果及组成变化[J]. *环境工程学报*, 2005, 6(9): 54-57.

(上接第 85 页)

- [2] HUGHES R M, GAKSTATTER J H, SHIRAZI M A, et al. An approach for determining biological integrity in flowing waters [M]. In-place resource inventories : principles and practices A N W. Paper presented at the workshop August 9-14, 1981. Society of American Foresters, Bethesda, Maryland. 1982, 877-888.
- [3] BAPTISTA D F, BUSS D F, EGLER M, et al. A multimetric index based on benthic macroinvertebrates for evaluation of Atlantic Forest streams at Rio de Janeiro State, Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 575: 83-94.
- [4] JUN Y C, WON D H, LEE S H, et al. A Multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(10): 3599-3628.
- [5] BREINE J, SIMOENS I, GOETHALS P, et al. A fish-based index of biotic integrity for upstream brooks in Flanders (Belgium)[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 522(1-3): 133-148.
- [6] 苏玉, 曹晓峰, 黄艺. 应用底栖动物完整性指数评价滇池流域入湖河流生态系统健康[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 91-98.
- [7] 熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍, 等. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(6): 1067-1078.
- [8] 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 等. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价——以流溪河为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 342-357.
- [9] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1270-1279.
- [10] 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 基于鱼类和底栖动物生物完整性指数的济南市水体健康评价[J]. *环境科学研究*, 2019(8): 1384-1394.
- [11] KIM J J, ATIQUÉ U, AN K G. Long-term ecological health assessment of a restored urban stream based on chemical water quality, physical habitat conditions and biological integrity[J]. *Water*, 2019, 11(1): 114.
- [12] LI J, LI Y, QIAN B, et al. Development and validation of a bacteria-based index of biotic integrity for assessing the ecological status of urban rivers: A case study of Qinhuai River basin in Nanjing, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 161-167.
- [13] 徐后涛. 上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [14] 于志慧. 太湖流域平原河网地区城市化背景下的河流健康评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [15] 罗坤. 城市化背景下河流健康评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [16] WALSH C J, WALLER K A, GEHLING J, et al. Riverine invertebrate assemblages are degraded more by catchment urbanisation than by riparian deforestation[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52(3): 574-587.
- [17] 陈晓宏, 江涛, 陈俊合. 水环境评价与规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [18] WANG S L, ZOU Z H. Application of information entropy-based grey clustering method on water quality assessment[J]. *Mathematics in Practice & Theory*, 2012, 42(21): 83-89.
- [19] 魏桢, 贾海峰, 姜其贵, 等. 再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6540-6546.
- [20] CATCH B. How to define, assess and monitor the ecological status of rivers, lakes and coastal waters[M]. Regional Implementation of the EU water Framework Directive in the Baltic Sea Catchment. CATCH Theme Report, Work Package 1. BERNET c/o Fyn County. 2006.
- [21] SCHAUMBURG J, SCHRANZ C, FOERSTER J. Ecological classification of macrophytes and phytobenthos for rivers in Germany according to the Water Framework Directive[J]. *Limnologica*, 2004, 34: 283-301.
- [22] 计叶, 吴雨蒙, 许秋瑾. 水环境的生物监测方法及其应用[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 616-622.
- [23] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1404-1415.
- [24] 阴琨, 王业耀. 水生态环境质量评价体系研究[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(1): 1-8.
- [25] 王业耀, 阴琨, 杨琦, 等. 河流水生态环境质量评价方法研究与应用进展[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(4): 1-9.