



移动扫码阅读

马建中,黄和,贾利,等.水深对立体种植沉水植物污染物去除效果的影响[J].能源环境保护,2021,35(5): 37-42.

MA Jianzhong, HUANG He, JIA Li, et al. Effect of water level on the removal of pollutants by submerged plants planted in three dimensions[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 37-42.

水深对立体种植沉水植物污染物去除效果的影响

马建中,黄和,贾利,朱宇军

(中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司,安徽合肥 230601)

摘要:选取苦草和黑藻两种沉水植物作为实验材料,考察了水深对 COD_{Mn} 、总氮和总磷去除效果的影响。结果表明:经过14天处理,苦草和黑藻在1.5 m水深对水体中 COD_{Mn} 的去除率分别达到52%和56%;经过12天处理,两种沉水植物水样总氮含量均低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,1.2 m水深的除氮效率比0.3 m水深分别提高13%和20%;经过8天处理后,两种沉水植物在0.9 m至1.2 m水深总磷含量均低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,除磷效率均超过62%;水深对于沉水植物污染物去除效果的影响来自根/茎生长及植物表面生物膜量的增加,0.9 m和1.5 m水深表面有机质含量高于其他水深,分别占鲜重 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,有机质含量提高了约12%;水深为1.5 m时,苦草和黑藻的根长较1.2 m水深分别减小8%和40%,由此导致 COD_{Mn} 和总氮去除效果在1.5 m水深范围内没有明显变化;苦草和黑藻的最佳种植深度为0.9~1.2 m。

关键词:沉水植物;湿地模拟系统;脱氮除磷

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)05-0037-06

Effect of water level on the removal of pollutants by submerged plants planted in three dimensions

MA Jianzhong, HUANG He, JIA Li, ZHU Yujun

(China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: Two kinds of submerged plants, tape grass and black algae, were selected as experimental materials to investigate the effects of water depth on the removals of COD_{Mn} , total nitrogen and total phosphorus. The results showed the removal rates of COD_{Mn} treated by tape grass and black algae for 14 days at the water depth of 1.5 m were 52% and 56%, respectively. After treated by either of the two submerged plants for 12 days, the total nitrogen concentrations reduced to below $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the nitrogen removal rates at 1.2 m were 13% and 20% higher than those at 0.3 m, respectively. After treated by either of the two submerged plants for 8 days, the total phosphorus concentrations reduced to below $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at the water depth from 0.9 m to 1.2 m, and the total phosphorus removal rates were more than 62%. The influence of water depth on the pollutant removal by submerged plants was because of the growth of root and stem and the biofilm on plant surface. At 0.9 m and 1.5 m, the surface organic matter contents were $2.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $2.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in fresh weight, respectively, which were both increased by about 12% and higher than that at any other water depths. The root lengths of tape grass and black algae at 1.5 m were 8% and 40% less than those at 1.2 m, respectively. As a result, the removal effects of COD_{Mn} and total nitrogen did not change significantly at 1.5 m. The optimum planting depth of tape grass and black algae was 0.9~1.2 m.

Key Words: Submerged plant; Simulated wetlands system; Nitrogen and phosphorus removal

0 引 言

2017 年中国生态环境状况公报显示,被监测营养状态的湖泊(水库)中有 3.67% 处于中度富营养状态,26.61% 为轻度富营养^[1]。以长期以来一直坚持治理的太湖为例,其绝大多数水体仍处于中度富营养状态。过量排放氮(N)和磷(P)是导致地表水富营养化主要原因,从而引起湖泊和河流生态环境恶化。富营养化导致湖泊由以草为主的多样性藻类湖泊向以蓝藻为主的湖泊转变,导致湖泊生态平衡遭到破坏^[2-3]。其中,水体较高的磷浓度被认为是蓝藻爆发的关键因素。

植物修复是一种将过剩营养转化为有价值的植物生物量的简便、廉价、环保的方法。沉水植物作为水生生态系统的主要生产者,已被证明有助于淡水生态系统的稳定并促进周围水体的污染去除,沉水植物可释放化学感应物质抑制蓝藻的生长。此外,它们还为鱼类提供了栖息地,同时减少了由浮游植物引起的水体浑浊,并为细菌、藻类等微生物的生长提供天然底物,形成生物膜或称为附生微生物群落,有效抑制有害藻华的形成,在调节湖泊功能和维持生态平衡方面发挥着重要作用^[4],种植沉水植物已被广泛用于恢复富营养化水体的生态环境。

受生长型影响,不同沉水植物对水深的适应

对策和能力之间存在较大差异^[6-7]。莲座型植物(如苦草多以生理上的改变,如改变地上/地下生物量来适应水深的变化,而狐尾藻等冠层型植物更倾向于通过形态的改变,如改变茎叶的长度等来响应水深环境的变化^[8]。同时水深与水体的多个环境要素(如光照、水温、CO₂浓度、压力、溶解氧、风浪、光质和底泥等)密切相关,深刻影响着沉水植物的生长繁殖等环节^[9],但是水深变化对于沉水植物污染物的去除效果却鲜有研究。因此明确各种沉水植物对水深的响应机制,才能通过灵活的水深调控实现植被的机动管理,保障植被的成活率和水域覆盖度。为了研究水位波动对沉水植物形态及污染物去除效果的影响,本研究通过室内模拟实验系统地研究了水位波动和苦草之间的生态响应。

1 实验方法

设计内径 380 mm、高 1 650 mm 的圆柱状无盖有机玻璃桶为反应器(如图 1),在 400 mm 和 800 mm 处分别设置一个取水口用于取样,50 mm 处设一个出水口用于实验结束后排水。反应器内水体深度均为 1 580 mm。设计内径 340 mm、高 150 mm 的无盖有机玻璃桶作为栽种盆,并设置深度为 80 mm 的石英砂作为固定基质。反应器侧面使用铝箔纸进行遮光处理。

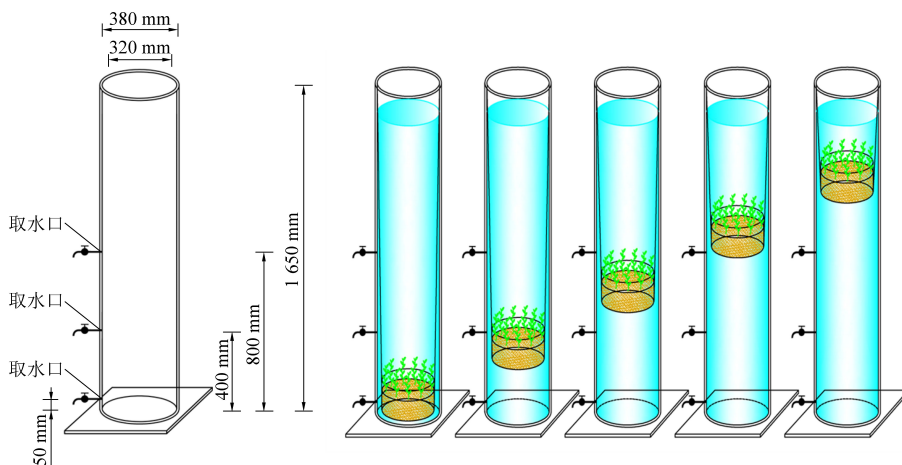


图 1 水深实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of water depth experiment device

选取苦草和黑藻两种沉水植物作为实验材料,每组种植一定量的沉水植物(每组苦草共 (29.94 ± 0.71) g, 约 12 株,株平均鲜重 (2.45 ± 0.27) g,平均叶长 (22.4 ± 0.8) mm,平均根长 (6.4 ± 1.5) mm;每组黑藻共 (30.41 ± 0.73) g, 10 株,株平均鲜重 (3.02 ± 0.33) g,平均茎长 (53.2 ± 6.2) mm,

平均根长 (7.0 ± 1.4) mm)。反应器设定 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m 五个水深梯度(以基质上表面为准)。实验用水取自无锡望虞河,取水时间为 2020 年 9 月 19 日,水样取回后置于冷藏柜子中保存,每日取用分析量约为 100 mL。为防止取回水样变质,通过检测水质 TOC 和 254 nm 吸光度的变

化判定。水体中 COD_{Mn} 采用国标化学需氧量测定方法 (GB 11914—89), 总氮和总磷分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894—89) 和过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法 (GB 11893—89)。

2 结果与讨论

2.1 沉水植物去除 COD_{Mn} 效果对水深的响应

COD_{Mn} 是影响水质的重要指标之一, 控制自然水体中的 COD_{Mn} 含量是提高自然水体水质的重要保障。由图 2 可知, 苦草和黑藻对水体中有机物 (COD_{Mn}) 的去除率不高。在苦草生长的第 0~12 天, 水体有机物的含量略有下降, 但后期又回升。在黑藻组, 种植后的 0~4 天内, 水中的 COD_{Mn} 含量略有上升, 这是沉水植物对新环境的适应。在第 4~16 天 COD_{Mn} 含量开始下降, 且降低的速度较快,

这是因为沉水植物经过了饥饿培养后对营养物质的过量吸收。而第 16 天后 COD_{Mn} 的含量又开始增加, 是由于沉水植物释放胞外聚合物^[10], 且此时部分沉水植物开始凋亡。在第 16 天, 0.6 m 和 1.5 m 水深组的 COD_{Mn} 均降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之下, 达到《地表水环境质量标准 (GB 3838—2002)》(以下简称 GB 3838—2002) 中规定的 IV 类水高锰酸盐指数标准 ($\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。而在 16~24 天内 COD_{Mn} 含量又开始上升。整个周期内水体中 COD_{Mn} 含量呈不规则波动, 且两种沉水植物对水中 COD_{Mn} 的去除效果均不明显。两种沉水植物在 24 天的实验时间内, 在 1.5 m 的水深内对 COD 的去除效率都达到 50%, 相比于 0.9 m 以上水深大约提高了 15%。但是水深对苦草和黑藻的各自 COD_{Mn} 去除效果差异影响并不明显。

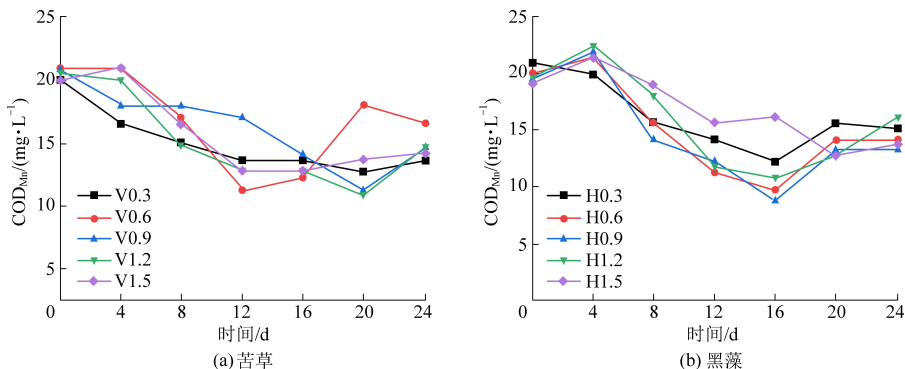


图 2 沉水植物系统的 COD_{Mn} 变化

Fig.2 Changes of COD_{Mn} in the submerged plant system

利用扫描电镜 (SEM) 研究了不同水深条件下苦草叶片表面生物膜的形态如图 3 所示。

5 组均苦草叶片吸附了大量的微生物, 但表

面生物膜从分布上来看并不均匀。水深 0.6 m 和 1.5 m 组的生物膜在视觉上微生物和相关的衍生物数量较多。苦草叶片表面吸附了大量的颗

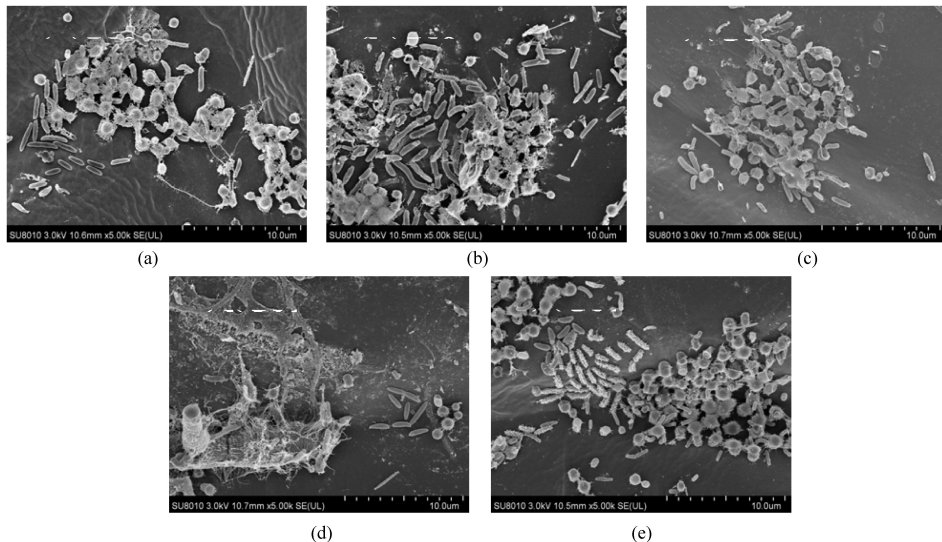


图 3 $10 \mu\text{m}$ 尺度下苦草表面扫描电镜图像

Fig.3 Scan electronic microscope of tape grass ($10 \mu\text{m}$)

粒,包括蓝藻以及球菌、芽孢杆菌等细菌。造成这种现象的原因有两个。首先,天然水体中含有蓝藻等众多的微生物,之前的研究也表明,高营养含量会导致浅水湖泊大型沉水植物附生藻类过度生长。其次,细菌等微生物表面化学基团的静态累积使得它们容易附着在苦草叶片之上。

采用 TOC 法测定苦草叶片表面微生物及其衍生有机物的含量,如图 4。不同水深下,苦草叶片表面生物膜的生物量及表面有机物的量差别不大。0.9 m 和 1.5 m 组 TOC 含量略高于其他组,分别达到 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 鲜重,与 SEM 图像结果基本一致。

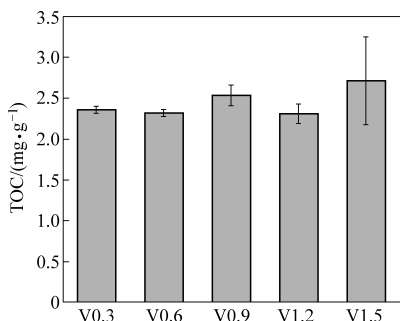
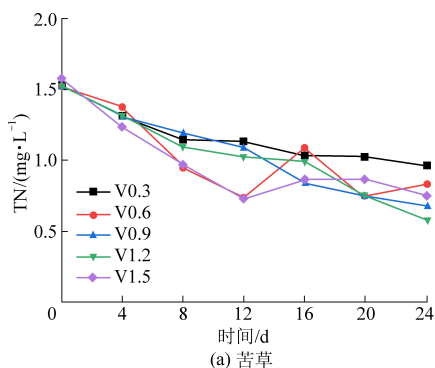
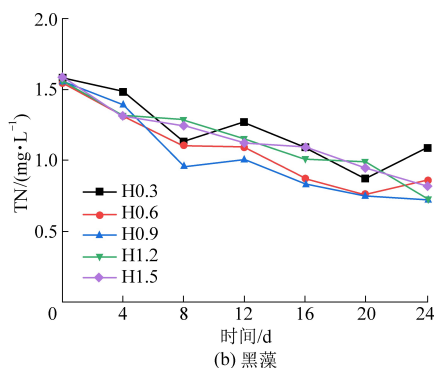


图 4 苦草表面有机碳含量变化

Fig.4 TOC change of tape grass



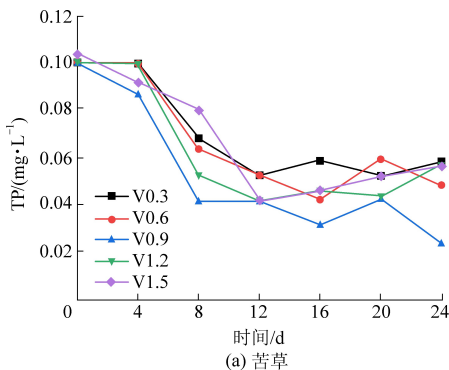
(a) 苦草



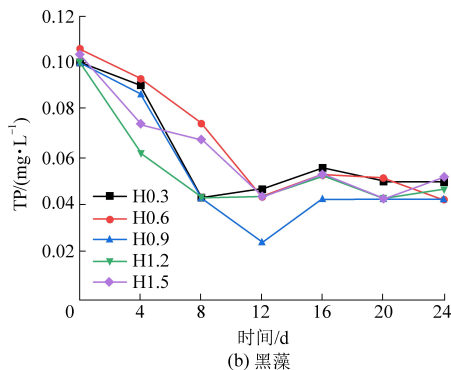
(b) 黑藻

图 5 沉水植物系统的总氮变化

Fig.5 Changes of total nitrogen in the submerged plant system



(a) 苦草



(b) 黑藻

图 6 沉水植物系统的总磷变化

Fig.6 Changes of total phosphorus in the submerged plant system

2.2 沉水植物去除总氮效果对水深的响应

作为引起水体富营养化的重要元素之一,控制天然水体中的 N 对于控制水体富营养化具有重要的意义。不同水深下苦草和黑藻对水体中总氮 (TN) 的去除效果如图 5 所示。由图可知,五种水深下的 TN 实验当天起开始减少,期间略有波动氮总体呈下降趋势。苦草在 0~12 天内对 TN 的去除速度略大于 12~24 天。苦草组在 12 天后,除 0.3 m 组外其余水深组的 TN 均低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到 GB 3838—2002 中的 III 类水标准 ($\text{TN} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。苦草沉水植物系统在水深 0.3 m 以下对总氮的去除效果要约提高 13%。黑藻组的 TN 从第 0 天开始下降,同样地虽然 TN 含量略有波动但整体呈下降趋势。黑藻组 0~16 天内对 TN 的削减速度大于 16~24 天。且在 0.6 m 和 0.9 m 组在 16~24 天内 TN 都低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到 GB 3838—2002 中的 III 类水标准 ($\text{TN} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。黑藻沉水植物系统在 0.3 m 以下对总氮的去除效果约提高 20%,相比苦草,水深对黑藻去除总氮的提升效果更为明显。

2.3 沉水植物去除总磷效果对水深的响应

不同水深下苦草和黑藻对污水中总磷 (TP) 的去除效果如图 6 所示。

苦草组地表水体中 TP 的含量在接种后的第 4 天才开始下降,4~8 天内迅速下降,8~24 天内上下波动。在 8~24 天,苦草 0.9 m 组的 TP 均低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水质达到动态平衡。在 12~24 天,黑藻 0.9 m 和 1.2 m 组的 TP 均低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到 GB 3838—2002 中的Ⅲ类水标准(湖泊 TP $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。以上实验结果表明沉水植物立体种植对污染水体的总磷去除效果显著,去除效率可达到 60%,但水深对沉水植物的总磷去除效果影响相比于总氮去除并不明显。

2.4 沉水植物形态对水深的响应

如图 7(a、b)所示,24 天后苦草的叶长随水深的增加呈增加趋势,在水深 1.5 m 处苦草的平均

叶长出现最大值为 24.0 cm。由于叶长随水深增加的幅度很小,因此水深对苦草平均叶长的影响是微弱的。造成这种现象的原因是苦草无茎或仅有匍匐茎而黑藻具有细长的茎,当环境水位增加时,黑藻会通过调节茎的长度来调整株高从而适应环境的变化^[10-11]。如图 7(c、d)所示,苦草的根长先随水深的增加而增加,在水深 0.9 m 处达到最长 12 cm 后在 1.2 m 处骤降又在 1.5 m 处回升至 11 cm。黑藻的根长随着水深的增加呈先增加再减小的趋势。在 0.3~1.2 m 之间,黑藻的根长逐渐增长,在水深 1.2 m 处,黑藻的根长可到 11 cm,增幅约 83%。但在水深 1.5 m 处黑藻根长增幅减小至 43%。

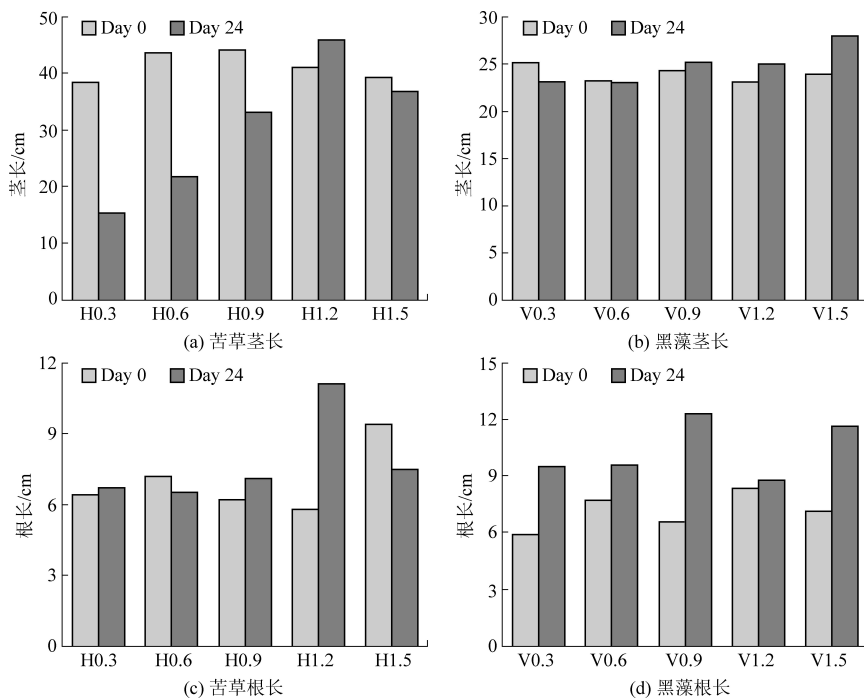


图 7 水深对沉水植物系统的茎、根长的影响

Fig.7 Effects of water depth on stem and root length of submerged plant system

3 结 论

本文通过对五种水深梯度下苦草和黑藻两种沉水植物的形态的变化和水体污染去除效果进行监测,研究了苦草和黑藻叶片对水深的响应。得出以下结论:

(1) 种植水深会对两种沉水植物的叶长、根长等生长状况造成影响。在极浅水深和深层水深时,沉水植物都会受到胁迫。

(2) 沉水植物系统对总磷和总氮都表现出一定的去除效果。

(3) 水深对沉水植物表面生物膜造成了影响。

不同水深下,除了生物膜的量不同外,微生物的种群结构也会产生变化。

(4) 综合考虑营养盐去除效果和沉水植物受胁迫程度,本实验中 0.9~1.2 m 是苦草和黑藻的最佳种植深度区间。

参考文献

- [1] 生态环境部. 2017 年中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 生态环境部, 2017.
- [2] Li H, Li Q, Luo X, et al. Responses of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* to a water depth gradient [J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134944.
- [3] Li K, Liu Z, Gu B, et al. Density-dependent effects of snail grazing on the growth of a submerged macrophyte, *Vallisneria*

- spiralis [J]. Ecological Complexity, 2009, 6: 438–442.
- [4] Li K, Liu Z, Hu Y, et al. Snail herbivory on submerged macrophytes and nutrient release: Implications for macrophyte management [J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1664–1667.
- [5] Li Q, Gu P, Zhang H, et al. Response of submerged macrophytes and leaf biofilms to the decline phase of microcystis aeruginosa: Antioxidant response, ultrastructure, microbial properties, and potential mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134325.
- [6] Liu Y, T Yao, L Zhu, et al. Bacterial diversity of freshwater Alpine Lake Puma Yumco on the Tibetan Plateau [J]. Geomicrobiology Journal, 2009, 26: 131–145.
- [7] Yi L, Wan C, Lee D J, et al. Microbial communities of aerobic granules: Granulation mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2014, 169: 344–351.
- [8] Michael T S, Shin H W, Hanna R, et al. A review of epiphyte community development: Surface interactions and settlement on seagrass [J]. Journal of Environmental Biology, 2008, 29 (4): 629–638.
- [9] Nilsson C. Distribution of stream-edge vegetation along a gradient of current velocity [J]. Journal of Ecology, 1987, 75: 513–522.
- [10] Li H, Li Q, Luo X, et al. Responses of the submerged macrophyte Vallisneria natans to a water depth gradient [J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134944.
- [11] Zhang H, Luo X, Li Q, et al. Response of the submerged macrophytes Vallisneria natans to snails at different densities [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 194: 110373.