

两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系

葛 滢¹, 常 杰¹, 王晓月², 徐青山¹

(1. 浙江大学生命科学院, 杭州 310012; 2. 杭州师范学院生物系, 杭州 310012)

摘要:通过模拟流水的小型无基质试验,研究了杭州地区 17 种草本植物在轻度和重度富营养化水中的净化能力及其与生物量、生长速率和蒸散强度等的关系。结果表明:(1)在重度富营养化水中,提高植物生物量可大大提高对 N 和 P 等的去除率;(2)在轻度富营养化水中,同种植物不同生物量对各指标去除率的差异小于种类间净化能力的差异,选择高净化能力的种类更重要;(3)在重度富营养化水净化工程选种中,可通过种间生物量和蒸散强度的比较来判断去除率的高低,初步筛选净化能力强的种类;在轻度富营养化水中,可通过植物在水中快速生长时期的生长速率判断其净化能力。

关键词:富营养化水;植物;生理生态特性;净化能力;简易选种方法

Relationship between the physiological characters and purification ability of different plants in waters with two trophic levels

GE Ying¹, CHANG Jie¹, WANG Xiao-Yue², XU Qing-Shan¹ (1. College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China; 2. Department of Biology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The relationship between the purification ability and the biomass, growth rate, evapotranspiration of 17 plant species of plants in heavy and light eutrophic water was studied through the minitype non-matrix experiment of imitates glide state. Results showed that: (1) In heavy eutrophic water, improving plant biomass could increase the removal rates of N and P. (2) In light eutrophic water, the difference of removal rates caused by biomass in the same species of plant were less than that of different species. To select the species with high purification ability is more important in this condition. (3) In heavy eutrophic water, the plant used for purification engineering in heavy eutrophic water could be selected by comparison of biomass and evaporation rates among the species; while in light eutrophic water, plant species could be selected by comparison of growth rates of the plants within the quick growth period.

Key words: eutrophic water, plant, physioecological characters, purification ability, easy method for species selection.

文章编号:1000-0933(2000)06-1050-06 中图分类号:Q948.116 文献标识码:A

当前,建立长期稳定的水质净化系统,保护水资源,改善生活环境,已成为城乡发展的重要问题。利用植物净化污水的工作已开展多年^[1~9],国内外已有一些工程取得了很好的效果,但是在植物如何发挥净化作用上,仍没有引起足够的重视。尽管有很多研究报道收割植物会使其在湿地去除富营养化成分时起很大作用^[2,6~9]。但由于发达国家人工费昂贵,而土地资源相对丰富,其人工湿地的运行一般倾向于无人维护的自然状态,所以国外的研究多考虑选用常见的自然湿地多年生植物或水生植物,研究净化能力^[2,7],而进一

基金项目:欧洲联盟资助项目,项目号:ERBIC18CT960059

收稿日期:1998-12-18;修订日期:1999-10-20

作者简介:葛滢(1964—),女,吉林省吉林市人,副教授。主要从事植物化学生态学、植物生理生态学、环境生态工程等方面研究。

万方数据

步以选择对 N、P 等富营养成分具高吸收能力植物为目标的研究较少。

中国人多地少,建立自然运行的净化用湿地不可能有足够面积的土地,只有将人工湿地工程与各种用途种植土地相结合,才有发展潜力。例如,建在城区或城郊的人工湿地还可兼为绿化、美化环境的绿地;建在农村及饲养场的人工湿地可以生产饲料,因为这里产生的污水没有重金属、有毒物质等问题;鱼塘边的人工湿地可以生产草鱼饵料;等等。不同用途需要选择不同的植物群,因此选择适合各种类型湿地、具高富营养成分吸收能力的植物有重要意义。由于这个问题在我国十分突出,所以需要我们自己作研究,并且此类研究结果在发展中国家具有普遍意义。

水体净化是植物吸收、微生物活动及砂石、水体物理化学过程等多种因素共同作用的结果,原理很复杂。因此,在选取植物时应根据什么原则,采取何种方法,是需要深入研究的首要问题。虽然生态工程的种植环境是湿地,但这种湿地的水状况是人为控制的,常有干湿交替的过程,所用植物种类并不一定是水生或湿生植物,能够在砂石基质中生长,具有发达根系的植物均可考虑采用。

根据上述各情况,在杭州附近依据生长环境及生长状况等参数,筛选出十几种野生植物,同时也选用了一些生长快速的作物。通过定期换水模拟流水状态的小型试验,在两种程度的富营养化水中进行栽培,观察其生长情况,测定不同种类对水中各种富营养成分的去除率,以选择当地具有较好净化效果的植物种类。同时根据试验结果,分析植物生长及生理性状与净化能力的关系,探讨植物净化富营养化水的原理,并发现选择植物时可依据的指标。

1 材料与方 法

1.1 植物栽培 Logatainer[®]是德国人发明的一种在水中栽培植物的载体(专利产品)。面积为 54.1cm×34.3cm,含 5×9 个小室,每小室下有一个 6mm 的孔使水出入。每室放一株植物,其中培育出的植物根系经一段时间后会盘成块状,可以很方便地移植到人工湿地净化工程中。因此,Logatainer 可直接用于水体净化,也可作为植物预培养之用^[10]。

1997 年春天,根据人工湿地的要求,在杭州市郊区的溪水及水塘边选择了 22 种植物,洗净泥土,栽入 Logatainer(德国赠送),再将 Logatainer 放入塑料盒中,加入 20cm 深的水(10kg 左右)培养,一星期更换一次水。经 2~4 周种植后,发现有 14 种植物生长较好,继续培养,并作净化能力比较试验,其余生长差的种类去掉。选定的植物种类有:1. 空心菜(*Ipomoea aquatica*),2. 凤眼莲(*Eichhornia crassipes*),3. 鸭跖草(*Commelina communis*),4. 野灯芯草(*Juncus setchuensis*),5. 知风草(*Eragrostis ferruginea*),6. 水芹(*Oenanthe javanica*),7. 喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*),8. 蝴蝶花(*Iris japonica*),9. 石菖蒲(*Acorus tatarinowii*),10. 酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*),11. 萱草(*Hemerocallis fulva*),12. 穹隆苔草(*Carex gibba*),13. 鸭芹(*Cryptotaenia japonica*),14. 狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)。1998 年重复、完善 1997 年的试验结果,并增加了芦苇(*Phragmites communis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和薏苡(*Coix lacryma-jobi*)3 种植物。由于野外各个种的萌发时间、体型大小和生长速率不同,因而植物材料的个体起始生物量有一定差异。经两个月的水中适应培养,种类之间因生长能力不同,生物量仍有差异。但各个种的种植密度基本保持一致,在试验中计算同样面积内不同植物对污染物质的去除率,使试验结果具可比性,并且这与生态工程中的实际栽培时选取材料的情况一致。

1.2 试验处理 考虑到植物净化不同富营养化程度水所遇到的问题不同,本研究把同一种植物种植在轻度富营养化水和重度富营养化两种处理中,分别做净化效果试验:(1)轻度富营养化水,起始浓度范围为,总氮(TN):0.9~4.57mg/l,总磷(TP):0.2~0.60mg/l,NO₃⁻:0.4~0.52mg/l,相当于我国 5 级地面水标准,高于环保一般认定的出现富营养化起始浓度 TP>0.02mg/l,TN>0.3mg/l;(2)模拟重度富营养化水,TN:55.01mg/l,TP:10.86mg/l,NO₃⁻:22.76mg/l,接近啤酒厂排放的废水^[4],富营养化程度较高。

1.3 取样和测定方法 每次试验前对供试的 Logatainer 及其中栽种的植物用水清洗(不损伤根系)、风干(10min)、称重;每盒中加入 10kg 水,以后对轻度富营养水在第 3 天和第 5 天取水样,重度富营养化水在第 4 天和第 6 天取水样,并记录数据称盒中水重以换算 TN、TP、NO₃⁻ 等指标的总量及水分减少量。

水样在当天测定。其中,TN、TP 用过硫酸钾氧化法同时测定^[11],NO₃⁻ 用电极法测定^[12]。凯氏氮用差值

法换算^[11]: $KN = TN - NO_3^-$, 化学需氧量(COD)用 $KMnO_4$ 法测定, 电导率(COND)用电导率仪直接测定^[12]。去除率(R)的计算公式为:

$$R(\%) = ((C_0 \times V_0 - C_i \times V_i) \div (C_0 \times V_0)) \times 100$$

其中 C_0 为实验开始时的浓度, V_0 为实验开始时的体积, C_i 为第 i 天的浓度, V_i 为第 i 天的水体积。

在以往的静态实验中, 有些通过添加蒸馏水或自来水以保持水体积不变, 从而观察所测指标浓度的降低^[4,7]。但这种做法存在一定的问题: 一方面, 水的蒸发和植物蒸腾引起的水体积减少是自然发生的过程, 加水不能反映自然条件下的过程; 另一方面, 加水后植物所在水的营养浓度被人为稀释, 植物的吸收行为也就发生变化, 很可能由于营养浓度降低, 使植物吸收能力减弱, 从而影响净化效果。本试验模拟自然状态水体的情况, 不添加水量, 而是通过称体重, 换算所观测指标的总量来计算去除率, 以使净化效果与自然状态更符合。

2 结果与分析

2.1 单位面积植物生物量及生长速率与 N、P 等成分去除率的关系 不同种类植物因其生理生态学特性不同, 单位面积上的生物量有较大差异。而建设人工湿地净化水的生态工程只需要了解单位面积净化效果, 并不考虑单位面积上有多少植物量。重要的是, 人工湿地净化富营养化水的结果是植物生长直接吸收与植物根区环境(砂石)中发生的物理、化学和生物学作用的综合效应。所以本试验并不强调每盒中植物生物量一致(实际上也不可能使多个植物种单位面积的生物量一致), 而是保持起始植株数基本一致。培养一段时间后, 生长较好的植物种类叶片基本布满水平空间, 但也有些植物的器官和构件出现死亡现象。

分析植物生物量与总氮(TN)、凯氏氮(KN)、硝态氮(NO_3^-)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)等去除率指标及电导率(COND)降低率(相当于离子浓度降低率)的关系(表 1)发现, 在重度富营养化水中, 各种植物生物量与 N 和 P 去除率显著相关, 说明增加生物量对提高去除率有很大作用, 同种植物不同生物量的结果也如此(表 2)。这就是说, 在重度富营养化水中, 选择单位面积内生物量高的植物即可提高对 N 和 P 的净化效果, 但对 COD 的去除率作用不明显。

表 1 两种富营养水中 17 种植物生长特性与去除率的关系

Table 1 Relationship between growth characters (X) and removal rates (Y) of 17 plant species in two-level eutrophic water													
处理	项目	TN		NO_3^-		KN		TP		COD		COND	
		<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>
L	<i>B</i> (0.44~7.11)	36	0.048	36	-0.065	36	0.257	36	0.207	36	0.265	17	0.510**
H	<i>B</i> (0.14~7.74)	35	0.497**	35	0.489*	35	0.541**	35	0.597**	35	0.324	16	0.293
L	<i>G</i> (-0.16~0.33)	17	-0.113	17	-0.135	17	-0.381	17	0.374	17	-0.192	17	-0.526*
	<i>R</i> (-0.07~0.13)	17	0.162	17	0.162	17	-0.459	17	0.375	17	-0.141	17	-0.429
H	<i>G</i> (-0.16~0.31)	16	0.165	16	-0.059	16	-0.120	16	0.119	16	-0.319	16	0.591*
	<i>R</i> (-0.01~0.54)	16	0.180	16	0.222	16	0.079	16	0.132	16	-0.193	16	0.703**
L	<i>G_{sw}</i> (0.02~0.33)	8	0.958**	8	0.972**	8	-0.717	8	0.808**	8	0.028	8	-0.357
	<i>G_s</i> (-0.16~-0.01)	9	0.376	9	-0.276	9	0.422	9	0.088	9	-0.181	9	-0.279

注: $KN = TN - NO_3^-$; L: 轻度富营养化水 Light eutrophic water; H: 重度富营养化水 Heavy eutrophic water; *B*: 生物量 Biomass(kg/m^2); *G*: 绝对生长速率 Absolute growth rate($kg/m^2 \cdot d$); *R*: 相对生长速率 Relative growth rate($g/g \cdot d$); *G_{sw}*: 冬、春季绝对生长速率 Absolute growth rate in winter and spring($kg/m^2 \cdot d$); *G_s*: 夏季绝对生长速率 Absolute growth rate in summer($kg/m^2 \cdot d$); COND: 电导率的降低率 Reductive

在重度富营养化水中, 植物的绝对生长速率(G)和相对生长速率(R)均与 COND 的降低率正相关, 与其它各指标无显著相关。由于水中离子量的降低主要是植物吸收的结果, 因此具有高生长速率的植物就是那些能获得较多离子的植物。反之, 如果能获得较多的离子, 植物就可能具有较高的生长速率。

综合上两方数据, 在重度富营养化水中, 可通过各种类间生物量的比较来判断去除率的高低, 以选择净化能力强的植物种类。

表 2 两种富营养水中同种植物不同生物量对水中富营养成分去除率($n=2$)

Table 2 Removal rates of nutrients in two-level eutrophic water by the same species with different biomass						
处理	植物种	生物量	总氮 ^{b)}	总磷 ^{b)}	硝酸盐氮 ^{b)}	化学需氧量 ^{b)}
Treats	Plant species	Biomass(kg/m ²)	TN(%)	TP(%)	NO ₃ (%)	COD(%)
H ^{a)}	石菖蒲	1.64	53.91±1.36	33.86±5.46	46.05±1.43	-38.37±3.82
	<i>Acorus tatarinowii</i>	1.88	64.80±6.18	35.77±5.26	56.27±4.24	-68.15±12.3
H	喜旱莲子草	0.14	41.78±7.06	17.66±3.17	33.22±5.34	-27.67±8.60
	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.76	68.96±9.94	40.61±5.39	65.18±8.60	-37.05±0.76
H	鸭跖草	0.51	54.34±0.49	26.67±3.27	39.18±6.60	-48.27±9.96
	<i>Commelina communis</i>	1.91	94.70	93.62	87.81	29.12
L ^{a)}	石菖蒲	1.78	88.85±0.45	47.78	41.43±2.2	-12.75
	<i>Acorus tatarinowii</i>	1.88	76.97±1.52	42.89	33.22±3.08	11.83±1.60
L	喜旱莲子草	0.44	64.38±4.22	63.19±2.93	63.98±3.11	50.75±1.79
	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	1.44	69.08±6.26	66.40±12.6	71.67±8.40	47.78±8.31
L	鸭跖草	0.98	69.54±4.71	51.24	67.36±2.55	42.91±1.19
	<i>Commelina communis</i>	3.15	73.92±10.6	59.26	65.90±2.6	56.99±1.39

a)H=重度富营养化水 Heavy eutrophic water,L=轻度富营养化水 Light eutrophic water;b):数值为各参数去除率 The values are the removal rate of the parameters

在轻度富营养化水中,植物生物量除与 COND 的降低率有关外,与其它各指标去除率均无统计相关性。从表 2 也可见,对同种植物来说,虽然有时单位面积生物量较大的样盒去除水中各指标的能力略高于生物量较小的样盒,但其差异基本小于种间净化能力的差异。这表明种内调整生物量提高净化能力的作用小于植物种类间净化能力的差异,同时也说明对于营养很低的轻度富营养化水,提高单位面积内植物生物量对提高净化能力作用很小。

轻度富营养化水中,植物 G 与 COND 降低率显著负相关,与其它各指标无相关。进一步分析发现, G 在冬、春季时与水体中 N、P 去除率显著正相关,而在夏季则无相关。这说明,轻度富营养化水中,N 和 P 是植物生长的限制因子,植物只有减少离子总吸收量,提高 N 和 P 的相对吸收量才能有净生长。 G 与 COND 降低率的负相关也表明,植物在轻度富营养化水中不能具更高的生物量,因为高的生物量必然增加离子吸收总量,这样既不能增加生长速率,也不能提高植物对 N 和 P 的去除率。

2.2 植物对水中营养成份的去除率与蒸散强度之间的关系 在植物净化水体的过程中,有许多因素共同作用^[6~8]。植物-根际微生物系统净化水体中 N 的主要机制包括吸收、同化,还原成氨,以及反硝化作用等,而对 P 的净化,除了一部分被固定成难溶物质成为沉淀物外,可溶性 P 主要靠植物吸收。由于蒸腾拉力是植物吸收元素的主要动力,所以如果植物净化水体时被动吸收起主要作用,则净化能力应与蒸腾量有一定关系。另外,如果蒸腾作用与根活力相关,那么它也会间接影响基质中的微生物活动强度,从而与去除率有相关关系。在本研究中,各样盒自由水面的面积相同,所以各样盒的蒸发量一致,因而可用样盒蒸散强度(ET,Evapotranspiration,=植物蒸腾强度+水面蒸发强度)衡量植物吸水强度。在重度富营养化水中,ET 与植物对各指标的去除率呈显著或极显著相关,相关系数随水在样盒中停留时间的增加而提高(表 3)。除 COND 外,各指标与 ET 的相关在 5d 内符合同样规律,因此可使用同一模型由 ET 推算净化能力。

轻度富营养化水中,ET 与各种 N 指标的去除率显著正相关,其中只有 KN 含量在第 5 天时已接近 0,所以与 ET 的关系变不相关(表 3)。这说明,蒸腾拉力对植物去除水中 N 有重要作用。植物对 P 的去除率仅在冬春季与 ET 极显著正相关,在夏季则无统计相关性。这与 3.1 中生长速率对 P 的去除有显著作用的结果吻合。

3 讨论

(1)通过调整培养液中的元素平衡状态来提高植物产量和质量的研究在植物生理学及农学领域已具完整体系,许多成果已广泛应用于农业生产^[13]。但在水体富营养化治理中,一般只考虑 C、N 平衡等

对微生物净化作用的影响^[14],对高等植物营养平衡的研究和应用仍很少。在本研究中,由于重度富营养水中植物生物量与 N 和 P 的去除率正相关,因而为了提高植物对 N 和 P 的吸收能力,应该进一步提高生物量。从 3.1 的结果可知,在净化重度富营养化水时,能获得较多离子的植物就可能具有较高的生长速率。与 水培植物用的全营养液^[13]比较,本研究所用重度富营养化水中 N、P 离子相对含量较高,而其它矿质元素相对含量很低。本试验室已完成的其它研究也表明,野灯芯草、空心菜等植物在全营养液中比在重度及轻度富营养化水中生物量更高。由此可推断,重度富营养水中植物生长的限制因子是 N、P 以外的其它矿质元素。可通过补加其它元素增加生长速率,以提高植物的生物量,进而提高其对 N 和 P 的吸收。应进一步研究在高 N 和 P 含量水中需要补充哪些元素。

COD 只在重度富营养化水中与 ET 有一定相关,与植物生长无统计相关,但在夏季植物生长速率出现负值时,COD 的去除率也为负值。这是因为植物凋落有机物溶入水中,提高了 COD。其它研究也有相似结果^[14]。草本植物到夏季植株已较高,易出现倒伏、部分叶片死亡等现象,在高温期更明显。如果能适当收割,使净化用植物经常保持有较好的生长潜力,则可缓解这一问题。

表 3 两种富营养水中 17 种植物蒸散强度与去除率的关系

Table 3 Relationship between evapotranspiration rate (X) and removal rates (Y) of 17 plant species in two-level eutrophic water

处理 Treats	项目(变化范围) Items(Range)	TN		NO ₃ ⁻		KN		TP		COD		COND	
		<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>
L	E_{3d} (2.29~23.7)	36	0.629**	36	0.250	36	0.532**	36	0.175	36	-0.295	17	0.326
	E_{5d} (4.58~47.4)	36	0.676**	36	0.801**	36	0.120	36	0.173	36	0.000	17	0.636*
	E_{sw} (4.58~23.6)	8	0.976**	8	0.958**	8	0.595	8	0.976**	8	0.121	8	0.107
	E_s (15.2~47.4)	28	0.494**	28	0.851**	28	0.298	28	0.094	28	-0.323	9	0.961**
H	E_{3d} (2.33~34.8)	35	0.674	35	0.177	35	0.550**	35	0.637**	35	0.096	16	-0.231
	E_{5d} (4.66~60.4)	35	0.773**	35	0.757**	35	0.672**	35	0.739**	35	0.413*	16	0.562*

* KN=TN-NO₃⁻; L=轻度富营养化水 Light eutrophic water; H=重度富营养化水 Heavy eutrophic water; E_{sw} :冬、春季蒸散强度 Evapotranspiration rate (kg/d·m²) in winter and spring; E_s :夏季蒸散强度 Evapotranspiration rate in summer; *: $P<0.05$, **: $P<0.01$

在重度富营养化水中, ET 与各指标去除率的关系比生物量和生长与各指标去除率的关系更好,作为选择净化用植物指标更有效。由于蒸散或蒸腾是在野外环境下迅速测定的指标,所以本研究为人工湿地植物种类选择找到了一个更加简便、实用的方法。

(2)植物在轻度富营养化水中停留 5d 时,对 TN 和 NO₃⁻ 的去除率与蒸散的相关系数虽然比 3d 时提高,但相关形式己为饱和和曲线。当 $ET<6.5\text{kg/m}^2\cdot\text{d}$ 时,植物对 TN 和 NO₃⁻ 的去除率与 ET 显著相关($r_{TN}=0.7898^{**}$, $n=26$; $r_{NO_3^-}=0.9004^{**}$, $n=26$)。当 $ET>6.5\text{kg/m}^2\cdot\text{d}$ 后,增加 ET 对提高去除率的影响很小。这是因为,与重度富营养水相比,轻度富营养水中 N 的含量很低,当植物吸取了一定量后,水体中可提供的营养物质已基本耗竭,此时加大蒸散量也不可能再提高植物的吸收率。另外,第 3 天时 ET 对每天各指标去除率的贡献大于第 5 天时,也说明增加水在净化装置内的停留时间对提高去除率的作用不大,与重度富营养化水中明显不同。而观察 ET 与 COND 降低率的关系发现, $ET>7\text{kg/m}^2\cdot\text{d}$ 时水中离子吸收率明显增加。由于离子降低率与植物生长速率负相关(参见 3.1 节),所以轻度富营养化水中所用植物的蒸散强度不应过高,水的停留时间也应适当减少。

水体中 N 和 P 净化原理的差异^[6~8]明显地表现在本文对轻度富营养化水的分析结果中。植物对 P 的去除率仅在冬春季与 C 和 ET 极显著正相关,在夏季则无相关。这是因为杭州地区夏季持续高温,抑制植物生长,尽管 ET 仍很高,但植物 G 较小甚至为负;而杭州冬季温度并不持续很低,常绿植物仍有一定生长。这样的相关结果说明,植物在生长过程中的主动吸收能力决定了 P 的去除率。植物对 N 的去除行为与 P 不同,春季为数据 NO₃⁻ 去除率均与 ET 极显著正相关(表 3), G 则只在春季与 TN 及 NO₃⁻ 去除率正相关(表 1)。这是因为 N 的去除有一部分是微生物活动完成的,夏季尽管植物生长不好,但较高的 ET 也是

因为植物较强的生理活动,对水体中微生物去除 N 的过程仍有促进。

综合上述分析,对于轻度富营养化水,可通过植物在水中快速生长时期的 G 值判断其净化能力,在净化过程中可尝试通过收割来控制植物的生物量,促进生长速率以提高净化能力。

(3)根据上述综合分析及各种植物净化能力分析结果可以确定,空心菜、鸭趾草、野灯芯草、薹苳、黑麦草、芦苇、水芹均适合用于重度富营养化水的净化;鸭趾草、喜旱莲子草、空心菜、酸模叶蓼、野灯芯草、芦苇、黑麦草、水芹等适合于轻度水的净化,石菖蒲和萱草净化能力略低,但其优势是常绿,可四季使用。

5 结论

(1)在重度富营养化水中,提高植物生物量可大大提高对 N 和 P 等的去除率。由于蒸散强度与 N、P 等去除率的关系更为密切,因而在选择净化植物时,可通过种间蒸散强度的比较来判断去除能力的高低。在野外根据单位面积生物量和蒸腾强度的简易测定,即可初步筛选净化能力强的种类。

(2)在轻度富营养化水中,同种植物不同生物量对各指标去除率的差异小于种类间净化能力的差异,故选择净化能力强的种类更重要,在选种时,可通过植物在水中快速生长时期的绝对生长速率判断其净化能力。

(3)重度富营养化水中植物生长的限制因子是 N、P 以外的其它矿质元素。可尝试补充一些矿质元素以提高植物的生物量,进而提高植物对 N 和 P 的吸收能力。在轻度富营养化水中,N 和 P 是植物生长的限制因子,植物在轻度富营养化水中不应有高生物量,在水中的停留时间也应适当减少,可考虑通过收割来控制植物的生物量,促进生长速率以提高净化能力。

参考文献

[1] 黄立南,蓝崇钰. 湿地处理污水的研究. 生态科学, 1996, 15(2):117~120.

[2] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, *et al.* Role of aquatica plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Wat. Res.*, 1986, 20(3): 363~368.

[3] 缪绅裕,陈桂珠,黄玉山,等. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环. 生态学报,1999,19(2):236~241.

[4] 戴全裕,蒋兴昌,张 衍,等. 水蕹菜对啤酒及饮食废水净化与资源化研究. 环境科学学报, 1996, 16(2):249~250.

[5] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展. 湖泊科学, 1996, 8(3):268~271.

[6] Tanner C C, Clayton J S and Upsdell M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands-II. Removal of nitrogen and phosphorus. *Wat. Res.*, 1995, 29(1): 27~34.

[7] Vermaat J E and Hanif M K. Performancce of common duckweed species (*Lemnaceae*) and the waterfem *Azolla filiculoides* on different types of waste water. *Wat. Res.*, 1998, 32(9):2569~2576.

[8] Breen P F. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment. *Wat. Res.*, 1990, 24(6):689~697.

[9] Harberl R, Perfler R and Mayer H. Constructed wetlands in Europe, *Wat. Sci. Tech.*, 1995, 32(3):305~315.

[10] Ziepk S. Pflanzen im sumpf. *Deutscher Gartenbau.* 1992, (26): 1576~1579.

[11] 钱君龙,府灵敏.用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷. 环境科学, 1987, 8(1):81~84.

[12] 国家环保局编.水和废水监测分析方法(第三版). 北京:中国环境科学出版社, 1989. 45~134.

[13] 潘瑞炽,董恩得.植物生理学. 北京:高等教育出版社,1995. 29~65.

[14] Ingersoll T L and Baker L A. Nitrate removal in wetland microcosms. *Wat. Res.*, 1998, 32(3):677~684.