

三江平原小叶章模拟实验对氮磷的净化

徐宏伟, 王效科*, 欧阳志云, 冯兆忠

(中国科学院生态环境研究中心系统生态室, 北京 100085)

摘要:模拟研究三江平原小叶章湿地生态系统对 N、P 的净化规律。结果表明,在小叶章生长期和成熟期,模拟系统对 N、P 的去除率随时间变化呈负指数型增长,最高去除率在实验初期分别达到 93.26%、98.98%;在净化过程中,P 的加入会促进模拟系统对 N 的吸收,并减缓其对 N 净化能力的衰退幅度,而模拟系统对 P 的净化不受 N 输入的影响。基于小叶章生态系统中 N、P 营养元素的分配和循环,小叶章对 N 元素的净化效应大于 P 元素,土壤子系统对 P 元素的净化起主导作用,整个模拟系统对 N、P 元素的净化效果很显著,总净化率分别可达 53.11%、58.95%。该结果为东北地区湿地净化功能的研究和非点源污染的治理提供理论根据。

关键词:三江平原;小叶章;模拟;净化;去除率

文章编号:1000-0933(2005)07-1720-05 **中图分类号:**Q948,X506 **文献标识码:**A

Study on purification of nitrogen and phosphorous in *Deyeuxia angustifolia* simulated experiment in Sanjiang Plain, China

XU Hong-Wei, WANG Xiao-Ke*, OUYANG Zhi-Yun, FENG Zhao-Zhong (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1720~1724.

Abstract: It is important to better understand the nutrient distribution and circulation of the *Deyeuxia angustifolia* wetland in Sanjiang Plain, as this ecosystem plays a unique role in the ecological service functions of the region. However, little attention has been paid to the purification function of the wetlands in the Sanjiang Plain. Due to the agricultural exploitation since 1950's, over-fertilization has resulted severe in non-point pollution in the region. A potted plant experiment was conducted in Sanjiang Plain in 2004 to investigate the process and regulation of N and P purification of *Deyeuxia angustifolia*. Six levels of N and P input concentrations were set up, each for three repetitions. The water, soil, and plants were re-sampled, and TN and TP concentration in them were determined and analyzed.

Results showed that the removal rate of N and P presents negative exponential increasing with time in a simulated ecosystem of *Deyeuxia angustifolia*. The highest removal rate of N and P was 93.26% and 98.98% in the early period of experiment, respectively. One reason is that *Deyeuxia angustifolia* grows quickly, and absorbs significant N and P. The other reason is that N and P content in soil is originally lower, and significant N and P can be absorbed through some routes. During the purification process, the purification role of N was promoted, while the purification decay extent was decreased through input of P. However, the purification role of P was not affected by input of N. Based on the distribution and circulation of N and P in the simulated ecosystem of *Deyeuxia angustifolia*, the vegetable sub-system was vital to the purification role of N, while soil sub-system played an important role in the purification of P. The purification effect of N and P was made apparent across the whole simulated ecosystem, where the purifying rate was 53.11% and 58.95%, respectively. This study can provide the scientific basis for understanding the purification function in the wetlands of the Northeastern region and in planning for the effective control of the non-point pollution.

基金项目:国家自然科学重点基金资助项目(30230090)

收稿日期:2005-01-04; **修订日期:**2005-05-20

作者简介:徐宏伟(1979~),男,浙江人,硕士生,主要从事生态系统服务功能研究。E-mail: xuhongwei@eyou.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangxk@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 30230090)

Received date: 2005-01-04; **Accepted date:** 2005-05-10

Biography: XU Hong-Wei, Master candidate, mainly engaged in ecosystem service function. E-mail: xuhongwei@eyou.com

Key words: Sanjiang Plain; *Deyeuxia angustifolia*; simulated; purification; removal rate

非点源污染已成为世界各国的一种主要污染源。在我国,由于过量使用化肥,且氮(N)、磷(P)利用率只有 28%~41%^[1],很大一部分流失,严重影响了水体环境。如何减少废水中营养元素(特别是 N、P)的排放量已引起了世界范围的重视,特别是在发达国家,对排放水中 N 和 P 含量有严格的控制标准^[2,3]。因此,研究湿地对污水中 N、P 的去除机制十分必要。近年来欧洲许多国家,如意大利、德国、芬兰等国,开展利用人工湿地对营养元素的净化研究,其 N、P 的净化效果均可达 50%以上^[4~6]。在美国 Apopka 湖进行的天然湿地对 N、P 净化研究表明:受自然因素的影响,净化率只在 30%~50%之间^[7]。在国内,主要在河北白洋淀进行芦苇湿地对 N、P 截留的研究,其水陆交错带对陆源营养物质有强烈的截留作用,TN 和 TP 的截留分别为 42%和 65%^[8]。

三江平原是我国最大的沼泽湿地集中分布区,小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)为多年生禾草,是三江平原沼泽化草甸的建群种或优势种^[9]。三江平原湿地自 20 世纪 50 年代开发农业以来,由于农田施肥量的大幅度增加,三江平原湿地的水资源受到污染。如何充分地发挥三江平原湿地的净化作用,解决当地非点源污染问题,是学者们关注的热点之一。而目前对三江平原湿地的净化功能研究较少。本实验通过模拟三江平原小叶章湿地生态系统,研究其对 N、P 的净化过程及其规律,并根据 N、P 在模拟系统中的分配,探讨小叶章湿地生态系统 N、P 的净化容量,为更好地解决该地区非点源污染问题提供理论依据。

1 材料和研究方法

1.1 实验材料

模拟实验的主要设备包括实验桶、药品溶液桶、水箱及输液管(见图 1)。取 18 个实验桶($h=35\text{cm}$, $r=15\text{cm}$),分 6 个处理水平(见表 1),每个处理水平 3 个重复。移取三江平原小叶章湿地的植被和土壤草根层、泥炭层(土壤 N、P 含量本底值分别为:3.55%、873.96 mg/kg)于实验桶中,使其保持与天然状态一致,并保证各实验桶中小叶章密度相近(180~200 株/桶)。用输液管将水箱、药品溶液桶与实验桶连接。在实验桶的上沿距土壤表层 5cm 处开一小口,以控制水位,用塑料管导出。水样采集完全按照规范的操作步骤进行^[10]。

1.2 模拟实验研究方法

用硝酸钾(KNO₃)、氯化铵(NH₄Cl)和磷酸二氢钾(KH₂PO₄)配制不同 N、P 浓度的混合溶液来模拟污水,往各实验桶中以 3L/d 的流速持续输入,模拟系统中水的更新周期为 24h。

1.3 采样时间及测定方法

实验测定水样中的总氮(TN)、总磷(TP)以及小叶章植物中 TN、TP。水样采集从 2004 年 6 月 3 日开始,每 4d 取一次,共 19 次,所采水样在三江平原沼泽湿地试验站(简称“三江站”)进行测定。模拟系统中的植物样在实验始末阶段各采集一次,在三江站进行初步处理后,带回生态环境研究中心实验室进行测定。

水样中 TN、TP 的测定按《水和废水监测分析方法》^[9]测定。植物样中 TN、TP 的测定分别采用半微量开氏定氮法和酸溶—钼锑抗比色法。

1.4 去除率的计算

根据本实验具体情况,去除率主要针对小叶章模拟系统对水体 N、P 的净化效果而定义,指的是模拟污水中 N、P 通过模拟系统中小叶章的吸收、土壤的吸附和挥发所损失的部分与输入量的比值。在实际运算过程中,以药品溶液作为模拟系统中 N、P 的输入量,水体中残留和流失作为模拟系统中 N、P 的输出量,其去除率的计算公式为:

$$P(\%) = (Q_{\text{输入量}} - Q_{\text{残留量}} - Q_{\text{流失量}}) / Q_{\text{输入量}}$$

2 结果与讨论

2.1 不同处理条件下小叶章模拟系统对 TN 的净化作用

通过 II、III、V、VI 四种处理条件下小叶章模拟系统中 N 输出量的变化,可以看出在小叶章生长期、成熟期和凋落期模拟系

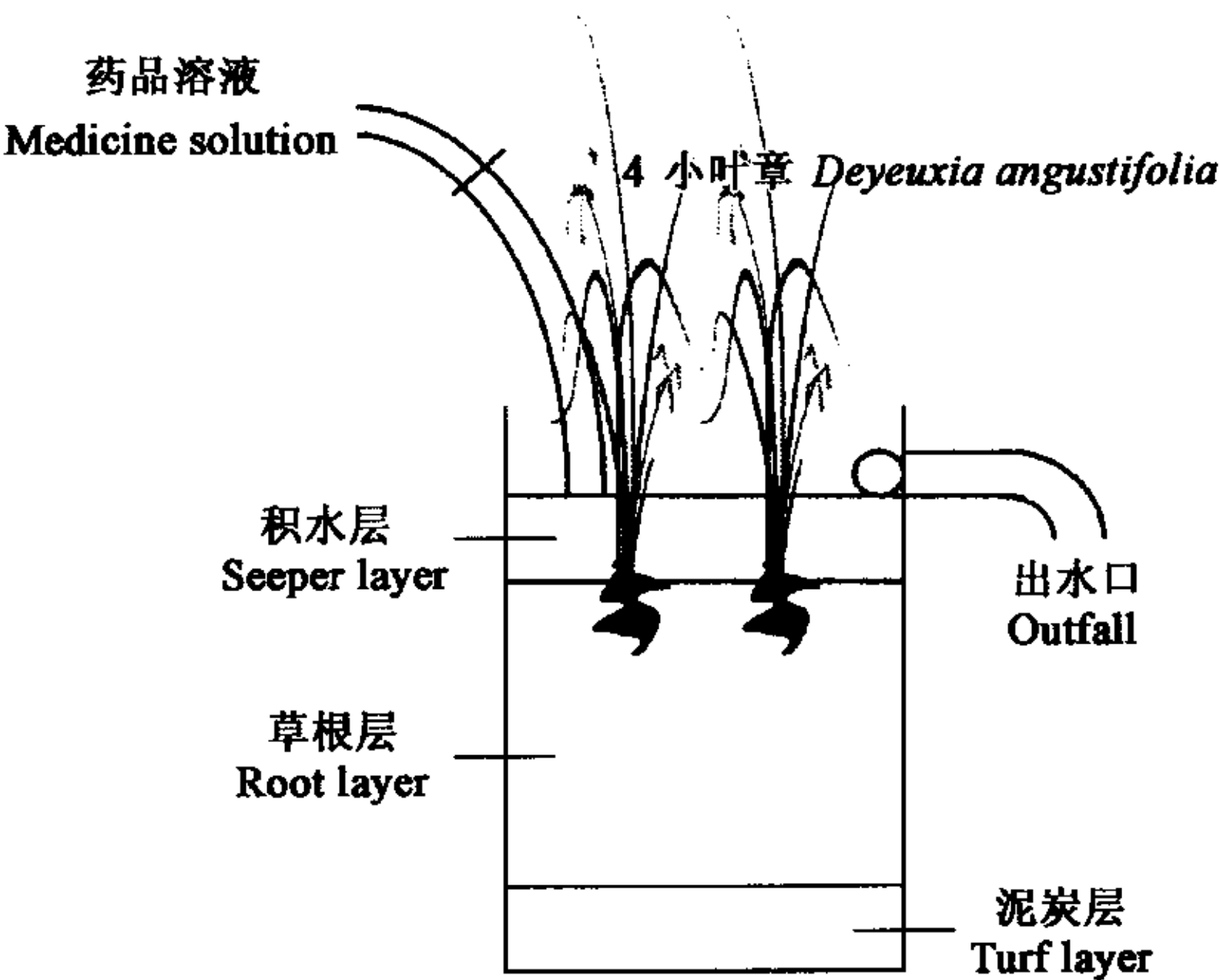


图 1 实验桶设计示意图

Fig. 1 The sketch map of experimental tub

表 1 不同处理水平下 N、P 输入浓度

Table 1 The input concentration of N and P in different treatment						
输入元素 Elements Input	I	II	III	IV	V	VI
总氮 mg/L Total Nitrogen	—	20.00	40.00	—	20.00	40.00
总磷 mg/L Total Phosphor	—	—	—	30.00	30.00	30.00

统对 N 的净化能力大小及其变化。

从图 2 中可以看出,在实验过程中,不同处理的小叶章模拟系统对 N 的去除在实验初期(0~12d)很显著,平均去除率达到 93.26%。随后,N 的去除率开始下降,大约 40d 以后,即 7 月中旬,模拟系统对 N 的净化处于一个平稳阶段,保持在 40%~60%。但到了 60d 以后,模拟系统对 N 的去除率又开始缓慢下降,最后平均去除率只为 21.64%。在实验初期,小叶章处于快速生长期,其平均高度增长了 15.17cm,此时对 N 的吸收量很大。到 7 月中旬,小叶章生长高度变化不大,处于成熟期,生物量达到最大^[11],对 N 也保持一个稳定的吸收量。一般来说,土壤中 N 元素的形态和有效性主要取决于它们的吸附、解吸、沉淀、溶解等物理化学过程,它们的吸附和解吸过程都是一开始为快速反应,随后缓慢进行^[12],在小叶章凋落期(平均高度开始下降),模拟系统对 N 的净化过程仍在缓慢继续。

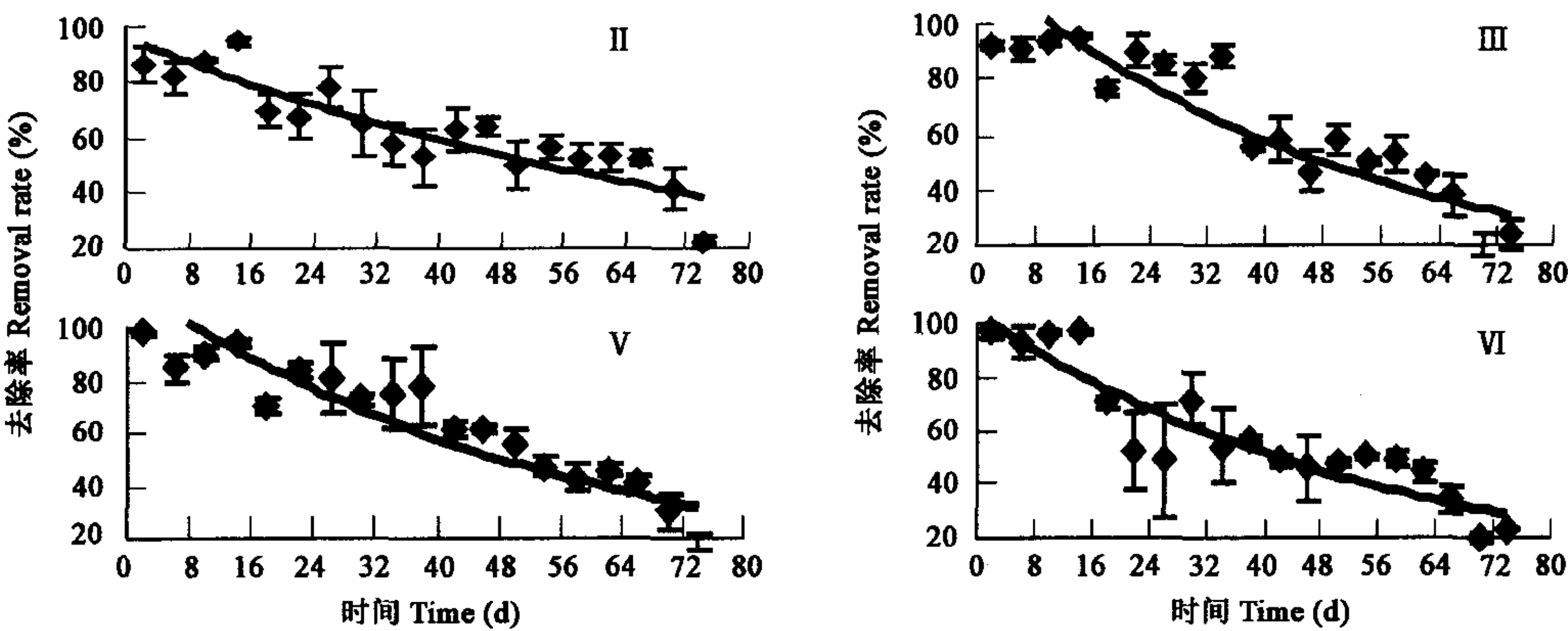


图 2 不同处理模拟系统对 TN 的净化过程
Fig. 2 The purification process of TN in different treatment

在实验过程中,不同处理表现出不同的净化效果,对去除率进行非线性回归,得到实验期间各处理小叶章模拟系统对 TN 净化拟合方程(见表 2)。不同处理小叶章模拟系统对 N 净化能力的衰退幅度:Ⅲ>Ⅴ>Ⅵ>Ⅱ。实验初期,输入 N 浓度越高(或加 P 元素),越促进小叶章生长,进而对 N 的吸收也更快,表现为在处理Ⅲ、Ⅴ和Ⅵ模拟系统的净化能力相近,且均高于处理Ⅱ。而此后所表现出来的差异为:处理Ⅲ模拟系统对 N 的净化能力下降最快,处理Ⅴ和Ⅵ模拟系统对 N 净化能力下降幅度相近,而处理Ⅱ模拟系统对 N 的净化能力下降幅度较小,这可能与其初期的去除能力不高有关。在实验末期,处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ小叶章模拟系统表现出相近的净化效果,去除率均在 20%左右。这可能由于小叶章处于凋落期,对 N 的吸收影响不大,并且各处理模拟系统中土壤对 N 元素的吸收、迁移和转化也达到一定的饱和度。

表 2 各处理小叶章模拟系统 TN、TP 净化拟合方程

Table 2 The purification fitted equation of TN and TP in different treatment of <i>Deyeuxia angustifolia</i>				
实验水平 Levels	TN		TP	
	拟合方程 Fitted equation	R ²	拟合方程 Fitted equation	R ²
Ⅱ	$y = 95.642e^{-0.0122x}$	0.7198**	—	—
Ⅲ	$y = 120.97e^{-0.0185x}$	0.8**	—	—
Ⅳ	—	—	$y = 103.81e^{-0.0151x}$	0.755**
Ⅴ	$y = 117.16e^{-0.0177x}$	0.8068**	$y = 97.286e^{-0.0141x}$	0.809**
Ⅵ	$y = 103.26e^{-0.0176x}$	0.8097**	$y = 92.868e^{-0.0138x}$	0.6936**

* * Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

2.2 不同处理条件下小叶章模拟系统对 TP 的净化作用

从图 3 中可以看出,3 个处理(Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ)小叶章模拟系统对 P 的净化能力在实验期间呈下降趋势。在 0~32 天期间,P 的平均去除率从 98.98%迅速下降到 63.04%。有研究表明,湿地生态系统对 P 的净化起主导作用的是土壤子系统,而植物对 P 的吸收作用相对较小^[13]。在实验初期,小叶章模拟系统中土壤含 P 量的本底值较低(873.96 mg/kg),对 P 有很好的截留和吸附作用^[14]。而当模拟系统的土壤含 P 量趋向饱和(此时土壤含 P 量为 1031.52mg/kg),对 P 的净化能力也随之下降。在 33~56d 期间,去除率处于一个稳定阶段,可能这个阶段土壤中含 P 量已趋向饱和,小叶章的吸收对 P 的净化起一定的作用。在实验末期,整个小叶章模拟系统对 P 的吸收还在缓慢进行,但其净化能力已经明显下降,去除率只有 20%~30%。

与对 N 净化能力的变化相比,不同处理下小叶章模拟系统对 P 净化能力的变化表现出相似的趋势。有研究显示^[15],小叶章湿地生态系统中输入的 N:P 比小于 14 的情况下,限制小叶章生长的是 N 元素,而不是 P 元素。在本实验过程中,N:P 输入量

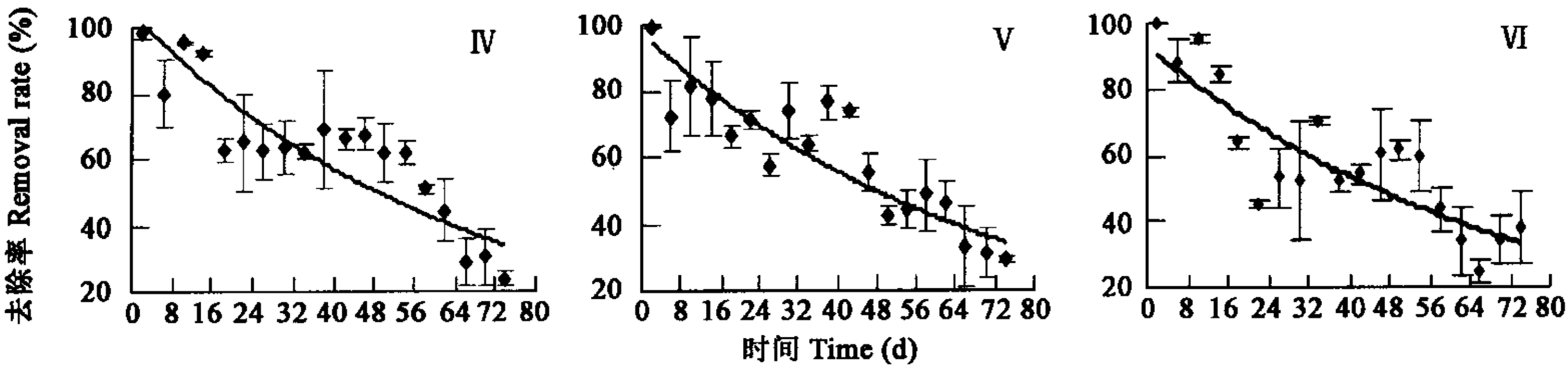


图3 不同处理模拟系统对 TP 的净化过程
Fig. 3 The purification process of TP in different treatment

比在 0.66~1.32 之间,远小于 14,因此小叶章的生长不受 P 输入量的影响,也就是说各处理条件下模拟系统对 P 的吸收水平相近,表现出对 P 的净化能力在小叶章生长期、成熟期和凋落期下降幅度和变化趋势相似(见表 2)。

2.3 小叶章 N、P 含量与不同处理模拟系统的净化关系

从小叶章 N 含量的数据分析结果可以看出(见表 3),整个实验阶段,各处理条件下小叶章中 N 增加量的大小依次为:Ⅲ>V>Ⅵ>Ⅱ。而模拟系统对 N 的平均去除率大小依次为:Ⅲ>V>Ⅰ>Ⅵ。这说明在无 P 输入时,N 输入浓度越高,小叶章对 N 吸收量越大,且净化效果也越好。这可能在小叶章对 N 的吸收容量范围内,输入 N 的增加,促进小叶章的生长,进而也增大了模拟系统对 N 的净化能力。而在有 P 输入时,情况则相反。小叶章在对 N、P 的吸收过程中,存在着一种动态平衡,输入 N 的增加,一方面促进小叶章的生长,而另一方面小叶章对 P 的吸收又减少了其对 N 的吸收,使得模拟系统对 N 的净化效果降低。总而言之,小叶章对 N 的吸收量越大,模拟系统对 N 的净化效果越好。

在有 P 的 3 个处理条件下,小叶章 P 含量的增加量依次为:V>Ⅵ>Ⅳ,不过吸收量很小。小叶章模拟系统对 P 的平均去除率在 58.55%~62.36%之间,且差异不大,这说明模拟系统对 P 的净化效果不受小叶章对 P 的吸收量的影响。小叶章对 P 的吸收主要集中在抽穗期,在成熟期和凋落期的吸收量很少。

2.4 小叶章模拟生态系统中的 N、P 分配

在小叶章模拟生态系统中,输入的 N、P 一部分被植物吸收利用,一部分被土壤吸附,一部分残留在水体中,还有一部分则挥发到大气中。实验期间,各处理条件下小叶章生长状况不同,也反映出 N、P 在各部分的分配不一致。由于实验条件有限,无法对土壤的吸附淋溶部分和挥发部分进行精确测定,故通过模拟系统内物质循环平衡间接得到表观损失值,以反映 N、P 净化过程中这两部分所起的作用。

从表 4 中可以看出,输入的 N 在小叶章模拟系统中主要被小叶章所吸收利用,约占 N 输入量的 37.75%~85.83%,表观损失部分(土壤吸附和氨化挥发)所占比例较小,尤其是在处理 V 条件下,得出表观损失为负值,可能由于土壤子系统在吸附和淋溶的动态平衡中,主要表现为对 N 的淋溶作用。通过对模拟系统中 P 的输入量、流失量、植物吸收量和表观损失量的分析,表观损失(主要为土壤吸附作用)所占比例很大,约占输入量的 54.18%~61.86%,说明模拟系统对 P 的净化起主导作用的是土壤子系统。相对而言,植物在 P 的净化过程中作用较小,只占输入量的 1.09%~2.61%。尽管在较短的时间内,植物对 P 的净化作用比土壤要小,但植物不断生长,从水体和土壤中吸收 P,故不能忽略植物对环境中 P 污染物的净化作用^[13]。

对于整个小叶章模拟生态系统系统而言,N、P 元素被植物的吸收利用、土壤的吸附以及挥发损失可分别占输入量的 53.11%、58.95%,说明小叶章模拟系统对 N、P 的净化起到很好的效果。通过对各处理的比较得出,N、P 元素的输入量比约在 2/3 左右时,其净化效果最好。一方面可能由于 N、P 同时输入,对小叶章的生长起到相互促进的作用;而另一方面可能当 N 输入量过多时,超过模拟系统的净化容量,反过来影响了对 P 的净化,使其效果变差。

3 结论

通过对三江平原小叶章模拟系统中 N、P 在水体中的时间动态研究,得出如下结论:

表 3 小叶章 N、P 含量与净化关系

Table 3 The relationship between purification and content of N and P in *Deyeuxia angustifolia*

	I	II	III	IV	V	VI
干物质(g/桶) Biomass	34.80	45.97	70.83	46.13	66.00	45.87
N 量(g/桶) N quantity	2.255	2.956	4.056	2.373	3.848	3.752
ΔN (g/桶)	—	0.700	1.800	—	1.592	1.497
去除率% removal rate	—	62.77	65.29	—	64.70	57.66
P 量(g/桶) P quantity	0.053	0.061	0.096	0.083	0.126	0.088
ΔP (g/桶)	—	—	—	0.030	0.073	0.035
去除率% removal rate	—	—	—	62.36	60.24	58.55

表 4 小叶章模拟生态系统中 N、P 元素分配

Table 4 Distribution of N and P elements in simulated Ecosystem of *Deyeuxia angustifolia*

项目 Item	氮 Nitrogen				磷 Phosphor		
	I (%)	II (%)	V (%)	VI (%)	IV (%)	V (%)	VI (%)
输入量(mg/桶)Input	1855.92(100)	3712.58(100)	1855.92(100)	3712.58(100)	2783.14(100)	2783.14(100)	2783.14(100)
流失量(mg/桶)Lose	909.31(49.00)	1627.47(43.84)	796.87(42.92)	1922.98(51.80)	1031.21(37.05)	1155.25(41.51)	1240.62(44.58)
植物吸收(mg/桶)Absorption	700.61(37.75)	1800.59(48.50)	1592.85(85.83)	1497.05(40.32)	30.40(1.09)	72.61(2.61)	34.57(1.24)
表观损失(mg/桶)Apparent losing	246.00(13.25)	284.52(7.66)	-533.80(-28.76)	292.55(7.88)	1721.53(61.86)	1555.28(55.88)	1507.95(54.18)

(1)小叶章模拟系统对 TN、TP 的去除率随时间变化呈负指数增长,在实验初期去除率可达到 90%以上,而在实验末期,去除率下降到 20%左右。但由于土壤的吸附和解吸作用,整个模拟系统对 N、P 的净化还在缓慢进行。同时,小叶章模拟系统对 P 的吸收会促进其对 N 的吸收,减缓其净化能力的衰退幅度。

(2)在小叶章模拟系统中,小叶章对 N 的净化起主导作用。在小叶章对 N 的吸收容量范围内,其含量的增加量越大,净化效果越好;而土壤对 P 有很显著的净化作用。

(3)在实验期间,小叶章模拟系统对 N、P 的总净化率平均可达 53.11%和 58.95%。三江平原小叶章湿地生态系统作为 N、P 汇,有很大的净化能力。这为东北地区农业非点源污染的治理提供理论依据。

References:

[1] Li S J,Li J M. Research process on losses of fertilizer nitrogen. *Agro-environmental Protection*,2001,**20**(5):377~379.

[2] Gersberg R M, *et al.* Nitrogen Removal in Artificial Eetlands. *Water Res*,1983,**17**(9):1009~1014.

[3] Bortone G, *et al.* Nitrification,Denitrification andBiological Phosphate Removal in Sequencing batch reactors treating piggery wastewater, Proic. Water Quality International'92,Washington D. C. ,24~30 May,*wat. Sci. and Technol.* ,1992,**26**(5~6):977~986.

[4] Paolo Mantovi,Marta Marmiroli,*et al.* Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. *Bioresource Technology*,2003,**88**:85~94.

[5] Christian R. Steinmann,Ssbine Weinhart,*et al.* A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment. *Water Research*,2003,**37**:2035~2042.

[6] Jari Koskiahho,Petri Ekholm,*et al.* Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands experiences under boreal conditions. *Ecological Engineering*,2003,**20**:89~103.

[7] Coveney M F,Stites D L,*et al.* Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration. *Ecological Engineering*,2002,**19**:141~159.

[8] Yin C Q,Lan Z W,Yan W J. Retention of allochthonous nutrients by ecotones of Baiyangdian Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*,1995,**6**(1):76~80.

[9] Ni H W,Zang S Y,Gao Y K. Study on seasonal dynamics of aboveground biomass and growth rate of *Deyeuxia angustifolia* population in marsh meadow on Sanjiang Plain. *Bulletin of Botanical Research*,1996,**16**(4):489~495.

[10] State Environmental Protection Administration of China. *Method of monitoring and analyzing water and wastewater quali*y(The third version),Beijing:Publishing Company of Chinese Environmental Sciences,

[11] Ni H W. Analysis on the dynamic of aboveground biomass and time sequence of different *Deyeuxia angustifolia* communities in Sanjiang Plain. *Bulletin of Botanical Research*,1999,**19**(1):88~93.

[12] Miao S Y,Chen G Z. Study of the dynamics of nitrogen and phosphorous release in soil of simulated wetland system. *Ecologic Science*,1998,**17**(2):24~27.

[13] Miao S Y,Chen G Z,Huang Y S,*et al.* Allocation and circulation of phosphorous in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system. *Acta Ecologica Sinica*,1999,**19**(2):236~241.

[14] Jiang C L,Cui G B,Fan X Q,*et al.* Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants. *Environmental Science*,2004,**25**(2):125~128.

[15] Sun X L,Liu J S,Chu Y R. Nitrogen dynamics in different organs of *Calamagrostis angustifolia* and *Carex lasiocarpa* in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2000,**11**(6):893~897

参考文献:

[1] 李世娟,李建民. 氮肥损失研究进展. 农业环境保护,2001,**20**(5):377~379.

[8] 尹澄清,兰智文,晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究. 应用生态学报,1995.1,**6**(1):76~80.

[9] 倪红伟,臧淑英,高亦珂. 三江平原沼泽化草甸小叶章种群地上生物量及其生长速率季节动态的研究. 植物研究,1996.10,**16**(4):489~495.

[10] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第 3 版). 北京:中国环境科学出版社,1989.

[11] 倪红伟. 三江平原不同群落小叶章种群地上生物量动态及其时间序列分析. 植物研究,1999,**19**(1):88~93.

[12] 缪绅裕,陈桂珠. 模拟湿地生态系统中土壤氮磷释放的动态研究. 生态科学,1998,**17**(2):24~27.

[13] 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.

[14] 姜翠玲,崔广柏,范晓秋,等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究. 环境科学,2004,**25**(2):125~128.

[15] 孙雪利,刘景双,褚衍儒. 三江平原小叶章和毛果苔草中 N 素营养动态分析. 应用生态学报,2000,**11**(6):893~897.