

白骨壤模拟湿地系统中磷的分配循环及其净化效应

陈桂葵¹, 陈桂珠^{2*}

(1. 华南农业大学农学院, 广州 510642; 2. 中山大学环境科学研究所, 广州 510275)

摘要:在温室中建立红树林植物白骨壤模拟湿地系统, 分别用正常、5 倍和 10 倍 3 种不同浓度的人工配置的污水每周定时定量对模拟系统进行污灌 1a。研究营养污染物 P 在系统中的分配、循环及其被净化的效果。结果表明: 随污水处理浓度的升高, 被更换的潮汐水中的含 P 量和土壤含 P 量都有明显提高; 植物体各部分含 P 量的高低顺序排列为: 叶>茎>根; 在植物-土壤系统中 4 个组分 C_{A0}、C_{A1}、C_{A5} 和 C_{A10} 植物中 P 元素的周转期依次为 4.70a、4.61a、3.80a 和 5.44a; 模拟植物-土壤系统对污水中 P 的净化效果显著, C_{A1}、C_{A5} 和 C_{A10} 组的净化率分别为 81.23%、94.40% 和 95.63%。

关键词:白骨壤; 模拟湿地系统; P; 分配; 循环; 净化效应

Phosphorus cycling in a simulated wastewater-affected mangrove (*Avicennia marina*) wetland system

CHEN Gui-Kui¹, CHEN Gui-Zhu² (1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 627~632.

Abstract: A greenhouse experiment was conducted to investigate the cycling of phosphorus in an artificial mangrove wetland system receiving P-containing "wastewater". *Avicennia marina* was selected as the only tested mangrove plant species, which grew in tanks containing soils collected from a mangrove tidal wetland in Shenzhen, South China. Artificial seawater with salinity of 15‰ was pumped into and out of the tanks at regular intervals to simulated semi-diurnal tidal conditions. Synthetic wastewater containing various levels of phosphorus (control, C₁, C₅ and C₁₀) was discharged into the artificial wetland twice a week for a year.

The results show that large amounts of phosphorus in the "wastewater" were removed by the soil after entering the artificial wetland system and the amount of soil-retained phosphorus increased with increasing content of phosphorus in the importing wastewater although the amount of phosphorus remained in the artificial tidal water also increased with increasing content of phosphorus in the importing wastewater. In general, the content of phosphorus in different organs was in the following decreasing order: leaf>stem>root. However, the content of phosphorus in different organs of the mangrove plant was not significantly different among the different wastewater treatments. This indicates that the retention of phosphorus by the mangrove plant was predominantly through the increased biomass rather than through the increased content of phosphorus in the plant organs. The total amount of phosphorus retained by the plant increased with increasing content of phosphorus in the importing wastewater (from control to C₅) and then decreased (from C₅ to C₁₀). The work here has demonstrated that artificial wetland system had good effects on removing phosphorus from the synthetic wastewater. The removal rates were 81.23%、94.40% and 95.63% for treatments C₁, C₅ and C₁₀, respectively. Therefore, this study has implications for the management of wastewater using mangrove wetlands.

Key words: *Avicennia marina*; simulated wetland system; phosphorus; wastewater; cycling

文章编号: 1000-0933(2005)03-0627-06 中图分类号: Q89 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39470151)

收稿日期: 2004-06-03; 修订日期: 2004-12-26

* 通讯作者 Author for correspondence

作者简介: 陈桂葵 (1972~), 女, 湖南株洲人, 讲师, 主要从事环境生态学研究。E-mail: guikuichen@163.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 39470151)

Received date: 2004-06-03; Accepted date: 2004-12-26

Biography: CHEN Gui-Kui, mainly engaged in environmental ecology. E-mail: guikuichen@163.com

红树林是全球热带海岸特有的湿地生态系统,由于它缺乏 N、P 营养物^[1, 2],因此对于富含 N、P 营养污染物的污水的处理与再利用特别有效,被视为很多污染物廉价而有效的处理厂^[3, 4]。随着沿海城市人口的激增,排入河口海湾的污水越来越多,海洋污染日益严重。因此,研究污染对河口海湾红树林的影响和红树林湿地处理城市污水及其可持续利用问题是当前红树林研究的热点之一。前人的研究认为:红树林是热带、亚热带潮间带的优势植物群落,能耐受高浓度的营养物^[5, 6]和重金属^[7],对有机废水具有较大的净化潜力^[8],底泥可作为废水污染物的沉积地^[9]。污水对红树林湿地系统中白骨壤植物^[10, 11]的影响以及湿地系统对污水的净化效应^[12]都已有报道,本文则研究营养污染物 P 在白骨壤模拟湿地系统中的分配循环规律及系统对 P 的净化效应,为红树林的可持续利用、保护海洋环境和海洋生物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用植物为马鞭草科(*Verbenaceae*)多年生的红树植物白骨壤(*Avicennia marina*)从湛江红树林育苗基地运回中山大学校内玻璃网室中种植。实验的底泥用深圳福田红树林林下底泥。海水是用海盐加自来水配置而成的人工海水,盐度为 15(深圳湾海水平均盐度)。

1.2 污水配置

参考“污水综合排放标准”^[13]及实测的香港城市污水中的各物质含量,确定正常浓度人工合成污水(代号 C₁)为如下浓度(表 1)。5 倍(C₅)和 10 倍(C₁₀)浓度污水所含物质分别是正常浓度污水的 5 倍和 10 倍。

表 1 正常浓度人工配置污水的污染物成分和浓度
Table 1 Pollutants and its' concentration of artificial synthetic wastewater

污染物成分 Pollutants	Total-N	Total-P	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Cd
浓度 Concentration(mg/L)	51.0	10.0	50.0	30.0	5.0	5.0	2.0	1.0	1.0	0.5	0.1

1.3 实验设计

在温室中建立红树林模拟湿地系统,试验共设 8 个处理组,每组由 3 个重复实验盆和 1 个潮汐盆组成(图 1),实验盆和潮汐盆均由 PVC 板制成,大小为:0.75m(长)×0.5m(宽)×0.4m(高)。每个实验盆内盛 100kg(风干土重)底泥(高约 0.3m)。第 I ~ IV 组的实验盆中每盆均匀种植 15 株白骨壤,第 V ~ VIII 组的实验盆中只盛土壤不种植物。实验盆共有 24 个,设有对照组,正常、5 倍和 10 倍浓度污水处理组,具体见表 2。

表 2 污水处理分组情况
Table 2 Treatment groups of wastewater discharging

组别 Treatment	种白骨壤植物 <i>Avicennia marina</i> planted				不种白骨壤植物 <i>Non-Avicennia marina</i> planted			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
浓度 Concentration	对照 A	正常浓度	5 倍浓度	10 倍浓度	对照 B	正常浓度	5 倍浓度	10 倍浓度
代号 Code name	C _{A0}	C _{A1}	C _{A5}	C _{A10}	C _{B0}	C _{B1}	C _{B5}	C _{B10}

通过定时器对水泵的自动控制,模拟潮汐每天 24h 内两涨两退,涨潮时人工海水被泵入 3 个连通的实验盆中,淹没底泥、植物的根和部分的茎,退潮时海水被泵入单个固定的潮汐盆中贮存。模拟系统每 2 个月更换 1 次潮汐海水,其间经常用淡水补充因蒸发而失去的水分,使盐度保持恒定。

1.4 污水排放

白骨壤移植成活、生长正常后开始进行污灌试验,对照组不灌污水,其余 3 组分别灌正常、5 倍和 10 倍浓度的人工污水。每周 2 次于退潮期内将不同浓度的污水均匀排灌到相应组的实验盆中,每次排放量为每盆 1.75L。灌污试验持续 1 年。

1.5 样品采集与分析方法

每 2 个月更换潮汐水时每盆取水样 1 个并记录潮汐水体积,总磷用钼锑抗分光光度法测定^[14]。灌污试验前后每盆土壤分上层(1~15cm)和下层(15~30cm)以对角线布点法各取 1 个混合样,风干研磨过筛,消化后用钼锑抗比色法测定总磷^[15]。

植物样品取实验前后的植株洗净,分不同部位 60℃下烘干,研磨过筛,用于测定生物量的部分在恒温 105℃下烘至恒重。凋落物随时收集洗净,分月汇总。植物样品的消化、测定方法同土壤。

2 结果与分析

2.1 水体子系统中含 P 量的变化

在 1a 的试验中,每 2 个月更换 1 次潮汐水,更换时测定潮汐水的体积并采样测定总 P 浓度,1a 内 6 次排出系统的潮汐

水的总磷浓度变化见表 3。

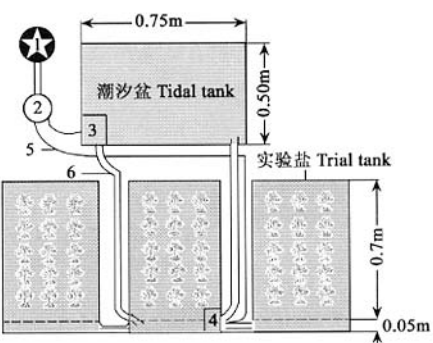
由表 3 可看出各污水处理组更换潮汐水中的总磷浓度随着污水处理浓度的增加而增大,但种有白骨壤系统的总 P 浓度增加没有未种白骨壤的那么大;在试验的 1 年期间,潮汐水中总 P 含量随污水浓度的增加而增加比随排污时间的延长而增加更明显。经 t 检测得知,试验一年期间种植物的 C_{A1} 组每次更换的潮汐水中 P 含量与对照组之间比无显著性差异。

1 年内更换潮汐水加入和带走的 P 总量分别见表 7 中的水体子系统中的加入和排出一栏。

2.2 土壤子系统中含 P 量的变化

土壤中总 P 含量的测定结果见表 4。表 4 中每组土壤的总磷量=每组土壤重×土壤总磷含量,每组土壤重=3(盆)×100kg(风干重)×(1-含水量)=284.217kg,其中土壤含水量为 5.261%。净增量指每组土壤试验后总 P 量减去试验前总 P 量(背景值)。

表 4 中 C_{A0} 和 C_{B0} 组净增量出现负值,表示这部分总磷量由土壤支出给了植物或水体。因为试验的 1a 中 C_{A0} 、 C_{B0} 组没有加入过污水,而每 2 个月更换 1 次潮汐水却会带走原来土壤中溶出的 P,同时植物也会吸收土壤中的 P。



1 电源 Power supply; 2 定时器 Timer;
3 涨潮泵 Pump for flooding thide; 4 退潮泵 Pump for ebbing tide;
5 电线 Wire; 6 水管 Hosepipe; 𣎵 白骨壤 *Avicennia marina*

图 1 白骨壤模拟湿地系统示意图
Fig.1 Sketch map of the *Avicennia marina* artificial wetland system

表 3 排出模拟系统的潮汐水的总磷浓度(mg/L)

Table 3 Total P concentration in tide water taken away from the artificial system(mg/L)						
组别 Treatment	1	2	3	4	5	6
C_{A0}	0.455±0.074	0.168±0.008	0.391±0.025	0.222±0.019	0.162±0.023	0.115±0.010
C_{A1}	0.580±0.070	0.213±0.018	0.479±0.051	0.625±0.025	0.259±0.030	0.347±0.014
C_{A5}	0.836**±0.048	0.416**±0.086	0.992**±0.060	1.303**±0.058	0.356**±0.045	0.505**±0.009
C_{A10}	2.238**±0.145	1.776**±0.090	2.148**±0.050	2.129**±0.126	2.628**±0.068	2.131**±0.038
C_{B0}	0.678±0.056	0.178±0.013	0.688±0.076	0.329±0.016	0.143±0.023	0.145±0.014
C_{B1}	0.771±0.094	0.222±0.006	1.337**±0.044	0.685±0.025	1.091**±0.082	1.156**±0.027
C_{B5}	2.146**±0.056	2.950**±0.066	2.276**±0.051	2.156**±0.050	2.944**±0.045	3.249**±0.028
C_{B10}	4.843**±0.165	5.262**±0.065	5.656**±0.101	4.325**±0.053	7.251**±0.076	9.683**±0.110

Mean±SD($n=3$), * $p<0.05$, ** $p<0.01$,采用 t 检测,各污水处理组分别与同系列对照组之间进行比较 There were significant difference between each treatment and it's control at a probability levels of 0.05and 0.01 according to t -test

表 4 土壤总 P 含量

Table 4 Total P concentration in soil				
组别 Treatment	取样位置 Location of sample		总磷量 Total amount of phosphorus(g)	净增量 Net increment(g)
	上层 Upper(P %)	下层 Lower(P %)		
背景值 Baseline	0.0259±0.001	0.0259±0.001	73.6903	
C_{A0}	0.0247±0.001	0.0257±0.001	71.5987	-2.0916
C_{A1}	0.0275±0.001	0.0255±0.001	75.3029	1.6126
C_{A5}	0.0341*±0.002	0.0323±0.003	94.4412	20.7509
C_{A10}	0.0424*±0.002	0.0415*±0.003	119.1784	45.4881
C_{B0}	0.0255±0.001	0.0262±0.002	73.4082	-0.2821
C_{B1}	0.0276±0.001	0.0271±0.001	77.7511	4.0608
C_{B5}	0.0357*±0.003	0.0326*±0.003	97.0810	23.3907
C_{B10}	0.0438**±0.001	0.0405**±0.001	119.9022	46.2119

Mean±SD($n=3$), * $p<0.05$, ** $p<0.01$,采用 t 检测,各污水处理组分别与背景值之间进行比较 There were significant difference between each treatment and it's baseline at a probability levels of 0.05 and 0.01 according to t -test after one year test

不同地区红树林土壤的含 P 量差异较大,本文测得土壤含 P 量背景值为 0.0259%,较之台湾竹围的 0.11%^[16]和福建九龙江口的 0.115%^[17]要低,较之海南的 0.004%^[18]和广西的 0.015%^[18]要高,接近深圳福田的 0.026%^[6]。由表 4 可知,随污水处理浓度的升高,土壤含 P 量明显提高,说明在土壤容量未饱和前,由污水所加入的营养污染物 P 可以被土壤不断的吸附。

2.3 植物体含 P 量的变化

对污灌前后的白骨壤植株各器官总磷含量进行测定的结果见表 5。表 5 反映出植物体各器官含 P 量的高低顺序排列为:叶>茎>根,这与林鹏等^[17]研究的自然环境下生长的白骨壤各器官含 P 量顺序一致,即幼枝>叶>多年生枝>树皮>树干材>根。表 5 中方差分析的结果显示,各处理组植株之间含 P 量无明显差异,说明营养污染物 P 在 1 年的实验中不断加入模拟系统并未对白骨壤植株的生长造成不利的影响。这与缪绅裕等^[6]对秋茄的研究结果相似。

表 5 白骨壤植物体各器官总磷含量(%)

Table 5 Total P concentration in different organs of Avicennia marina plants					
植物器官 Plant organ	试验前 Before trial	试验后 After a year trial			
		C _{A0}	C _{A1}	C _{A5}	C _{A10}
根 Root	0.0633±0.001	0.0723±0.006	0.0771±0.005	0.0863±0.002	0.0948±0.006
茎 Stem	0.0702±0.002	0.0752±0.006	0.0785±0.006	0.0896±0.005	0.0995±0.006
叶 Leaf	0.1087±0.001	0.1110±0.005	0.1142±0.001	0.1165±0.004	0.1204±0.007

Mean±SD(*n* = 3), 试验后同一器官各组间经方差分析,无显著差异(*p* > 0.05) There were no significant difference among different treatment groups in the same plant organ according to ANOVA

根据试验前随机选出 21 株白骨壤植株的生物量、茎高、茎径及各器官的重量实测数据求得有关器官的回归方程及相关系数^[11],然后根据回归方程及每组 45 株白骨壤试验前、后的茎高和茎径求出各组植株各器官试验前后的总生物量,并结合表 5 中试验前、后各器官的总磷含量计算出每组植物各器官总磷的年净吸收总量(即存留量)见表 6(不含凋落物部分)。

2.4 凋落物含 P 量的变化

污水处理期间收集的各组凋落物每月汇总统计出生物量,并分析各组凋落物的含 P 量,从而计算出凋落物所带走的总 P 量即归还量见表 7 中的凋落物带走一栏。

2.5 模拟系统中 P 的分配

如果不考虑模拟系统外其它因素的影响,则 P 在水体、土壤和植物 3 个子系统中的分配见表 7。

表 7 模拟系统中 P 的分配(g)

Table 7 Distribution of total-P in the artificial system (g)						
处理组 Treatment	水体 Seawater		土壤 Soil		植物 Plant	
	加入 Input	排出 Output	存留 Retention	支出 Output	存留 Retention	凋落物带走 Litters
C _{A0}	0.0762	0.1979		2.0916	1.5513	0.4509
C _{A1}	5.1162	0.3186	1.6126		2.5433	0.6921
C _{A5}	25.2762	0.5638	20.7509		3.1099	0.9825
C _{A10}	50.4762	1.7011	45.4881		2.7788	0.5775
C _{B0}	0.0762	0.2774		0.2821		
C _{B1}	5.1162	0.6154	4.0608			
C _{B5}	25.2762	1.8617	23.3907			
C _{B10}	50.4762	4.3667	46.2119			

2.6 P 在模拟湿地系统中的循环

假设实际由凋落物带走的 P 全部返回土壤子系统,则可构成整个模拟系统中 P 的循环。元素在植物中的循环速度可用元素周转期来表示,即某元素在现存量中的储存量与年凋落物中元素重量的比率^[17]。由表 5 的含 P 量乘以各组植物试验后的总干重计算出 C_{A0}~C_{A10}组植物中 P 的现存量依次为 2.1175 g、3.1891g、3.7348 g 和 3.1408g,结合表 7 中凋落物带走的 P 的重量可计算出各组植物 C_{A0}、C_{A1}、C_{A5}和 C_{A10} P 元素的周转期分别为 4.70a、4.61a、3.80a 和 5.44a。

由表 7 可算出凋落物含 P 量占植物体总吸收量的百分率,用归还率表示,即归还量/(存留量+归还量),结果为 C_{A0}组 22.52%, C_{A1}组 21.39%, C_{A5}组 24.01%, C_{A10}组 17.21%,平均为 21.28%,污水处理组平均为 20.87%,可见植物所吸收的磷大部分是储存在植物体内的,归还率较低。同时,各污水处理组磷的归还率与对照组比较接近,说明虽然污水处理组植物体对磷的吸收增加了,但凋落物中磷的归还率没有相应增加,可见,被植物吸收的营养污染物磷主要是植物用于生长,并没有增加归还环境的比率。

2.7 模拟湿地系统对污水中 P 的净化效应

系统对污水的净化效应可用净化率来表示,1a 时间内土壤或植物中 P 的存留量与水体加入的 P 量之比即为净化率^[12]。由表 7 可计算出各污水处理系统对污水中 P 的净化率见表 8。因 C_{A0}、C_{B0}组为对照组未灌污水,故未研究其净化率。

表 8 模拟湿地系统对污水中 P 的净化率(%)

Table 8 Purification rates of total-P in the artificial wetland system						
项目 Item	C _{A1}	C _{A5}	C _{A10}	C _{B1}	C _{B5}	C _{B10}
土壤子系统 Soil subsystem	31.52	82.10	90.12	79.37	92.54	91.55
植物子系统 Plant subsystem	49.71	12.30	5.51	—	—	—
总净化率 Total purification rate	81.23	94.40	95.63	79.37	92.54	91.55

由表 8 可见,随污水处理浓度的增加,种植植物的 C_A 系列的土壤子系统对 P 的净化率相应提高,而植物子系统对 P 的净化率下降。P 因为被白骨壤植物吸收作为它的营养元素,吸收量较大,所以 C_A 系列的土壤子系统的净化率反而比 C_B 系列的土壤子系统的净化率低,但总净化效应种植物的 C_A 系列比不种植物的 C_B 系列高。这里除了植物本身对污染物的吸收作用外,另一个重要原因可能是:在种植物的系统中存在一个有利于污染物降解的根际环境,即根际微生物协同植物根系和土壤发挥着积极作用,所以植物-土壤系统对磷污染的净化效率高于单独的土壤系统。

尽管白骨壤植物本身的净化率远低于土壤,但植物可以继续生长,可以不断吸收污染物,而且在自然界中红树林植物是高生产者,为其林下土壤中的小动物和微生物提供了丰富的食物来源,它们共同组成一个复杂的生态系统,所以植物-土壤系统对污染物修复的潜力是不可低估的。

3 讨论

由上述研究结果可以认为:用植物净化污水时必须考虑其中的总磷浓度不能过高,同时植物生长是无限的,可以源源不断地从水土中吸收 P 素来促进其自身的生长,所以植物对环境中污染物 P 的净化作用是不可低估的。另一方面,土壤吸收、吸附 P 素能力在短期内表现显著,但毕竟有一定的容量,所以必须用植物与土壤相结合为统一的湿地系统,对污水中 P 的净化作用才能可持续利用。

污水是综合性的指标,因此对整个系统而言,除了考虑营养污染物 P 的影响外,还应考虑其他因素如 N、各种重金属等对系统的影响,尤其是他们的综合效应。研究表明,尽管高浓度的人工污水对白骨壤的某些生理生态指标会有一定的影响^[10],但植物体仍能维持正常的生长,也未发现明显的受害症状^[11],说明红树植物白骨壤对人工污水的抗性较强,能耐受较高浓度的营养污染物(N 和 P),与前人的研究^[5, 6]结果一致。另外,由于红树林土壤本身所含的营养物质比较缺乏,导致了湿地系统对这些物质有较大的容量或承受力。

References:

[1] Boto K G, Willington J T. Nitrogen and phosphorus nutritional status of a northern Australian mangrove forest. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1983,11:63~69.

[2] Lin P. *Mangrove Ecosystem in China*. Beijing: Science Press, 1997.

[3] Breaux As, Farber S, Day J. Using natural coastal wetlands systems for wastewater treatment; an economic benefit analysis. *Journal Environmental Management*, 1995, 44:285~291.

[4] Clough B F, Boto K G, Attiwill P M. Mangrove and sewage: a reevaluation. In: Teas HJ ed. *Biology and Ecology of Mangrove*. Lancaster: Dr W. Junk Publishers,1983. 151~161.

[5] Chen G Z, Miao S Y, Wong Y S, et al. Allocation, cycle and purged effects of nutrient pollutant N in artificial wastewater in simulated *Kandelia candel* wetland system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996,16(1):44~50.

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

[7] Miao S Y, Chen G Z, Wong Y S, et al. Allocation and capacity of zinc in artificial wastewater in simulated wetland system with *Kandelia candel*. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 1999, 5(1):8~10.

[8] Dwivedii S N, Padkumar K G. Ecology of a mangrove swamp near Juhu beach, Bombay with reference to sewage pollution. In: Teas HJ ed. *Biology and Ecology of Mangrove*. Lancaster: Dr W. Junk Publishers,1983. 163~179.

[9] Tam NFY, Wong Yushan. Mangrove soils as sinks for wastewater borne pollutants. *Hydrobiologia*, 1995,293:231~242.

[10] Chen G K, Chen G Z, Wong Y S, et al. Effect of artificial wastewater on some eco-physiological characteristics of *Avicennia marina* seedlings. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999,10(1):95~98.

- [11] Chen G K, Chen G Z, Wong Y S, *et al.* Effect of synthetic wastewater on *Avicennia marina* growing under simulated tidal conditions. *Marine Environmental Science*, 2003, **22**(3):39~43.
- [12] Chen G Z, Chen G K, Tam NFY, *et al.* Purifying effects of *Avicennia marina* simulated wetland system on sewage. *Marine Environmental Science*, 2000, **19**(4):23~26.
- [13] Department of pollution control management, National environmental protection bureau. *A reference manual for pollution prevention and management of water*. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1991. 95~114.
- [14] State E P Administration. *Methods for the examination of water and wastewater analysis*, 3rd ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, Beijing, 1998. 280~286.
- [15] Nanjing Institute of Soil Science, Academia Sinica. *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, Shanghai, 1983. 95~97.
- [16] Chou C H, Bi C C. Dynamic distribution of nutrients and variation of environmental factors on Tamshui estuary ecosystem. *Proc. Natl. Sci. Counc. B. Taiwan*, 1990, **14**(3):131~141.
- [17] Lin P, Lin G H. Studies on the mangrove ecosystem of Jiulongjiang River Estuary of Fujian N. accumulation and biological cycle of N and P in *Kandelia cande* community. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1985, **9**(1):21~30.
- [18] Zhang X R, Luo X, Chen Y H. The mangrove and the acid tidal flat soil. *Journal of Natural Resources*, 1991, **6**(1):55~61.

参考文献:

- [2] 林鹏. 中国红树林生态系. 北京:科学出版社, 1997.
- [5] 陈桂珠, 缪绅裕, 黄玉山, 等. 人工污水中的 N 在模拟秋茄湿地系统中的分配循环及其净化效果. *环境科学学报*, 1996, **16**(1):44~50.
- [6] 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.
- [7] 缪绅裕, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 模拟试验初探秋茄湿地系统中锌的分配与土壤容量. *应用与环境生物学报*, 1999, **5**(1): 8~10.
- [10] 陈桂葵, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水对白骨壤幼苗生理生态特性的影响. *应用生态学报*, 1999, **10**(1):95~98.
- [11] 陈桂葵, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水对白骨壤生长的影响. *海洋环境科学*. 2003, **22**(3):39~43.
- [12] 陈桂珠, 陈桂葵, 谭凤仪, 等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应. *海洋环境科学*, 2000, **19**(4):23~26.
- [13] 国家环境保护局污染管理司. 水污染防治管理手册. 北京:中国环境科学出版社, 1991. 95~114.
- [14] 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, 1998. 280~286.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1983. 95~97.
- [17] 林鹏, 林光辉. 九龙江口红树林研究 IV. 秋茄群落的氮、磷的累积和循环. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, **9**(1):21~30.
- [18] 张希然, 罗旋, 陈研华. 红树林和酸性潮滩土. *自然资源学报*, 1991, **6**(1):55~61.