

鳊塘底泥修复方法的初步研究

王亚军, 林文辉, 吴淑勤, 潘厚军, 石存斌

(中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380)

摘要: 研究了6种不同处理方法对鳊(*Siniperca chuatsi*)塘底泥理化和生物性质的影响,并探讨了底泥理化因子和生物因子之间的相互关系。试验结果表明:1)池塘底泥经过处理后理化性质有所改变,碱化提高底泥酸碱度(pH)和可交换性钙含量,热熏显著降低底泥水分,提高碳/氮(C/N);2)干燥、干燥后再破碎、施无机氮肥等手段能显著提高土壤呼吸强度($P < 0.05$),其中干燥后再破碎效果最显著,提高了52.3%;3)土壤理化因子中对土壤呼吸强度的直接影响力(按绝对值大小)排序依次为pH > C/N > 有机质 > 水分 > 总氮(TN) > 总磷(TP),而TN和TP对土壤呼吸的影响是通过其他理化因子间接表现出来的;4)综合评价结果显示,各修复方法中整体效果最好的是干燥后破碎,其次是干燥,碱化效果最差,综合得分分别为0.905、0.895和0.695。试验结果不仅为鳊塘连作障碍的克服提供理论依据,同时也为其他水产动物疾病的预防和健康养殖提供了新的思路。

关键词: 鳊;连作障碍;底泥;改良;理化性质;土壤呼吸

中图分类号: S 965

文献标志码: A

文章编号: 1673-2227-(2010)05-0007-06

Preliminary study of restoration methods for sediment of *Siniperca chuatsi* ponds

WANG Yajun, LIN Wenhui, WU Shuqin, PAN Houjun, SHI Cunbin

(Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China)

Abstract: We studied the effects of six treatments on sediment of *Siniperca chuatsi* ponds and its biological properties. The results indicate: 1) Physicochemical factors of sediment change after treatment. Alkalization can increase sediment pH and exchangeable calcium content, while firing can decrease sediment moisture content but increase C : N ratio; 2) Drying, pulverization after drying and inorganic nitrogen fertilization can significantly increase soil respiration rate ($P < 0.05$). When the sediment is pulverized after being dried, the soil respiration rate increases by 52.3%; 3) The order of the effects of physicochemical factors on soil respiration is pH > C/N > organic matter > moisture content > total nitrogen (TN) > total phosphorous (TP), and TN and TP affect soil respiration via the other physicochemical factors. 4) In general, pulverization after drying is the best for sediment restoration (0.905), then comes drying (0.895), and the worst is alkalization (0.695). The study not only provides theoretical references for overcoming continuous cropping obstacle but also offers a new approach to disease prevention and healthy culture of other aquatic animals.

Key word: *Siniperca chuatsi*; continuous cropping obstacle; sediment; restoration; physicochemical factors; soil respiration

随着经济的快速发展和人民生活水平的提高,人们对水产品的需求量也日益增加。在利益的驱动

下,许多养殖户往往在同一池塘连续多年养殖同一品种或同一食性水产经济动物(农业上称为“连

收稿日期: 2010-03-22; 修订日期: 2010-05-12

资助项目: 农业公益性行业科研专项(200803013); 农业科技成果转化资金项目(2008GB23260393)

作者简介: 王亚军(1980-),男,助理研究员,从事水产动物健康养殖研究。E-mail: yjwang720@yahoo.com.cn

通讯作者: 吴淑勤, E-mail: wushuqin001@21cn.com

作”^[1]),在此养殖方式下,池塘生产性能不断衰退,鱼类病害频频发生,养殖环境出现严重的连作障碍。连作障碍产生的原因是池塘在连作过程中生态环境发生漂移而没有得到修复。池塘底泥是池塘生态系统中的一个非常重要的组成部分,水中的许多物质都是来源于与底泥的物质交换^[2],池塘底泥的理化和生物性质决定了泥土中的生物群落^[3],也决定了池塘水体中的水生生态组成^[4]。因此,可认为池塘底泥生态条件的漂移是连作障碍产生的根本原因,休耕期间对池塘底泥进行合理的修复就显得十分重要。

近年来调查发现,连作障碍也是鳊(*Siniperca chuatsi*)病害频发的主要原因之一。而以往对鳊病害的研究和防治主要是针对其病原,很少从池塘的

生态环境角度考虑。此试验研究了6种不同的处理方法对鳊塘底泥理化和生物性质的影响,探讨了底泥理化和生物性质之间的关系,并采用综合指数法对各修复方法进行了综合评价,旨在探索出适合鳊塘的修复方法,为鳊塘连作障碍的克服提供科学依据,同时也为其他水产动物疾病的预防和健康养殖提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验底泥

试验所用的底泥采自广东顺德龙江和江门荷塘2镇的3口鳊塘,池塘概况见表1。在池塘刚收获成鱼时,S型模式采集表层15 cm厚的池塘底泥,底泥采集后立即运回。

表1 池塘简介

Tab.1 Introduction of ponds

塘号 pond No.	地点 location	面积/m ² area	池塘年龄 pond age	养殖方式 culture mode	养殖概况 general information of aquaculture
1	顺德龙江	2037	10年	半封闭养殖方式	以前养大口黑鲈和蓝鳃太阳鱼,连续第2年养鳊。
2	江门荷塘	4000	60年左右	半封闭养殖方式	连续第2年养鳊,养鳊前几年养虾,在养殖过程中不时施有机肥
3	江门荷塘	2001	60年左右	半封闭养殖方式	连续第3年养鳊,养鳊前几年养虾和四大家鱼

1.2 土壤修复用品

生石灰(CaO)、硝酸钠(NaNO₃)、尿素[CO(NH₂)₂]均为实验室常用分析纯试剂。改良剂为市售产品,主要成分为聚合剂、氧化剂、吸附剂和pH稳定剂。干草即干稻草。

1.3 试验设计

将每口池塘底泥均分为6份,平铺于1.0 m×0.5 m×0.7 m水泥池里,泥层表面积0.35 m²,厚度0.10 m。底泥分为6个不同处理组,每个处理组由3口池塘底泥组成,即1个鳊塘底泥为1个重复。各处理方式如下。

干燥:将土壤置于太阳下直接暴晒;干燥后破碎:土壤干燥1周后,用铁锹翻动土壤,使其不板结,然后继续干燥;碱化:将石灰溶于水后直接泼洒在土壤上,CaO用量为0.57 kg·m⁻²;改良剂:水泥池中加0.25 m³自来水,然后根据说明进行使用;施肥:土壤干燥1周后,将12 g NaNO₃(0.034 kg·m⁻²)和10 g CO(NH₂)₂(0.029 kg·m⁻²)撒于土壤上;热熏:土壤干燥1周后,用2

kg干草(5.71 kg·m⁻²)在土壤上直接焚烧。

每组处理时间均为2周,处理完毕后,5点采样采集0.10 m厚土壤进行理化性质和土壤呼吸强度测定。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤理化性质的测定参考鲁如坤^[5]的方法,pH测定采用玻璃电极法,水土比例为1:1;水分测定采用失重法;有机质测定采用重铬酸钾氧化-容量法;总氮(TN)测定采用凯氏法;总磷(TP)测定采用酸溶-钼锑抗比色法;交换性钙用醋酸铵-原子吸收分光光度法。

1.5 土壤呼吸的测定

静态呼吸气室法,参考BOYD^[6]和杨继松等^[7]的方法。

1.6 土壤修复方法的综合评价

采用综合指数法^[8]评价各修复方法对土壤的改良效果,具体方法见表2。

1.7 数据处理

采用最小差异显著法(LSD)多重比较分析不

表2 土壤修复方法评价方法

Tab. 2 Evaluation method of soil restoration

评价指标 evaluation indicator		标准值 standard value	二级指标评价 evaluation of second-level indices	一级指标评价 evaluation of first-level indices	综合评价 comprehensive evaluation
一级指标 first-level indices	二级指标 second-level indices				
理化性质 physicochemical properties	pH	6.5 ~ 7.5 *	标准值为区间形式： ①若实测值在区间内，则评定 得分为 $p_i = 1$ ②若实测值不在区间内 $p_i = 1 - \frac{ \text{实测值} - \text{标准值}_{\max \text{ or min}} }{\text{标准值}_{\max \text{ or min}}}$ 标准值为特定值，采用上述② 中公式计算	$PI = \frac{1}{n} \sum p_i$	$P = \frac{1}{2} \sum PI$
	水分	平均值			
	有机质	1.5% ~ 2.5% *			
	TN	最低值			
	C/N	10 ~ 15 *			
生物性质 biological properties	TP	平均值			
	可交换性钙	平均值			
	土壤呼吸	最大值			

注：*，参考 BOYD^[6] 所述高产池塘土壤理化值

Note: *, refer to the soil physicochemical properties of high productive pond stated by BOYD^[6].

同处理后各指标的变化；采用通径分析对土壤理化指标和土壤呼吸变量进行相关分析。所有统计分析均在 SPSS 10.0 上进行。

2 结果

2.1 土壤的理化性质

土壤处理前后理化性质见表3。与处理前相比，池塘底泥经过处理后理化性质均有所改变，各处理手段均能使池塘底泥 pH 上升，其中碱化效果明显，pH 从 6.98 升高至 10.55，其余处理方法效果并不明显；水分受处理手段的影响较大，干燥、破碎、热熏能使底泥的含水量降低；干燥、破碎后，底泥中的有机质略有降低；施氮肥能使 TN 含量升高；碳/氮(C/N) 因处理手段不同而波动；用 CaO 进行碱化可以大幅度提高底泥可交换钙含量。

2.2 土壤呼吸强度

各处理方法均能提高土壤呼吸强度（表4）。通过 LSD-t 多重比较，与处理前相比，各处理方法中干燥、干燥后破碎、施肥等手段能显著地提高土壤呼吸强度（ $P < 0.05$ ），其中破碎效果最显著，提高了 52.3%，这说明池塘底泥干燥 1 周后进行破碎能够很好地改善土壤微生物条件，促进土壤矿化，降低土壤有机质含量。

2.3 多元回归分析

为研究土壤理化因子对土壤呼吸强度的影响，对土壤理化因子和呼吸强度进行多元回归分析。采

用逐步分析法对土壤呼吸强度与土壤各理化因子测定结果进行回归，得到多元回归方程：

$$U = 1.445X_1 + 0.124X_2 + 0.142X_3 + 0.009X_4 + 0.211X_5 + 0.004X_6$$

其中 U 为土壤呼吸强度， X_1 为 pH， X_2 为水分， X_3 为有机质， X_4 为 TN， X_5 为 C/N， X_6 为总磷(TP)。

因为采用的是逐步分析法，所以可交换性钙被排除。方程中的系数即直接通径系数，其乘以各理化因子之间的相关系数即间接通径系数^[9]。直接通径系数反应了各主要理化因子对土壤呼吸强度的直接影响，而间接通径系数却是一种间接影响力，指的是以主要理化因子通过其他理化因子对土壤呼吸强度产生的间接影响程度。这种影响力更具有客观性，因而也更具有真实表现力。通过表5可以看出，对土壤呼吸强度的直接影响力（按绝对值大小）排序依次为 pH > C/N > 有机质 > 水分 > TN > TP。土壤中 TN 对土壤呼吸直接影响较小，但其通过 C/N 对土壤呼吸产生的间接通径系数却达到了 0.150，是直接通径系数的 16.7 倍，可见 TN 对土壤呼吸的影响体现在间接影响上。与此类似，TP 对土壤呼吸的影响也是通过有机质间接表现的。

2.4 修复方法的评价

理化因子对土壤修复方法评价结果显示，改良剂对土壤理化因子的改良整体效果最好，其次是施无机氮肥，而碱化效果最差；采用土壤呼吸单因子评价修复效果可见，破碎对底泥生物因子的修复效

表3 土壤处理前后的理化指标

Tab. 3 Physicochemical indices of soil before and after treatment

	塘号 pond No.	处理前 before treatment	不同处理 different treatment					
			干燥 drying	干燥 + 破碎 drying + pulverization	碱化 alkalization	改良剂 improver	施肥 fertilization	热熏 firing
pH	1	7.05	7.18	7.20	11.05	7.42	7.15	7.32
	2	7.35	7.43	7.65	9.60	7.55	7.44	7.68
	3	6.55	6.73	7.00	11.00	6.67	6.75	7.16
	$\bar{X} \pm SE$	6.98 ± 0.40^a	7.11 ± 0.35^a	7.28 ± 0.33^a	10.55 ± 0.82^b	7.21 ± 0.48^a	7.11 ± 0.35^a	7.39 ± 0.27^a
$w(\text{水分})$ /% moisture content	1	1.7	1.4	1.3	2.0	2.4	2.0	1.2
	2	2.3	2.1	1.9	3.0	3.0	3.2	1.9
	3	2.5	2.2	2.0	3.5	4.1	3.8	1.8
	$\bar{X} \pm SE$	3.1 ± 0.90^{ac}	1.9 ± 0.44^{ab}	1.7 ± 0.38^b	2.8 ± 0.76^{abc}	3.2 ± 0.86^c	3.0 ± 0.92^{ac}	1.6 ± 0.38^b
$w(\text{有机质})$ /% organic matter	1	2.53	2.41	2.32	2.27	2.57	2.31	2.55
	2	3.19	3.08	2.95	3.21	3.39	3.22	3.05
	3	2.69	2.65	2.58	2.54	2.74	2.64	2.80
	$\bar{X} \pm SE$	2.80 ± 0.34	2.71 ± 0.34	2.62 ± 0.32	2.67 ± 0.48	2.90 ± 0.43	2.72 ± 0.46	2.80 ± 0.25
$w(\text{TN})$ /%	1	0.162	0.149	0.142	0.156	0.156	0.166	0.141
	2	0.225	0.218	0.219	0.219	0.220	0.240	0.200
	3	0.171	0.169	0.165	0.172	0.172	0.191	0.160
	$\bar{X} \pm SE$	0.186 ± 0.034	0.179 ± 0.036	0.175 ± 0.040	0.182 ± 0.033	0.183 ± 0.033	0.199 ± 0.038	0.167 ± 0.030
C/N	1	9.06	9.38	9.48	8.44	9.56	8.07	10.49
	2	8.22	8.20	7.81	8.50	8.94	7.78	8.85
	3	9.12	9.10	9.07	8.57	9.24	8.02	10.15
	$\bar{X} \pm SE$	8.80 ± 0.50^a	8.89 ± 0.62^{ab}	8.79 ± 0.87^a	8.50 ± 0.06^a	9.24 ± 0.31^{ab}	7.96 ± 0.15^a	9.83 ± 0.87^b
$w(\text{TP})$ /%	1	0.087	0.099	0.100	0.081	0.091	0.084	0.095
	2	0.172	0.179	0.186	0.174	0.177	0.176	0.178
	3	0.096	0.105	0.111	0.093	0.104	0.099	0.109
	$\bar{X} \pm SE$	0.118 ± 0.047	0.128 ± 0.046	0.132 ± 0.047	0.116 ± 0.051	0.124 ± 0.046	0.120 ± 0.049	0.127 ± 0.044
可交换 性钙 exchangeable calcium $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1	0.726	0.614	0.716	2.295	0.641	0.702	0.730
	2	0.843	0.838	0.829	2.120	0.942	0.856	0.850
	3	0.340	0.397	0.351	2.684	0.331	0.276	0.341
	$\bar{X} \pm SE$	0.636 ± 0.263^a	0.616 ± 0.221^a	0.632 ± 0.250^a	2.366 ± 0.289^b	0.638 ± 0.306^a	0.611 ± 0.300^a	0.640 ± 0.266^a

注：平均值行中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。LSD 检验，后表同此

Note: Means with different letters in the same line indicate significant differences ($P < 0.05$). LSD detection; the same case in the following table.

表4 土壤处理前后呼吸强度

Tab. 4 Soil respiration rate before and after treatment

	塘号 pond No.	处理前 before treatment	不同处理 different treatment					
			干燥 drying	破碎 pulverization	碱化 alkalization	改良剂 improver	施肥 fertilization	热熏 firing
土壤呼吸强度 $/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ soil respiration rate	1	33.575	47.564	50.362	36.093	39.170	46.165	37.771
	2	36.372	53.160	53.160	33.854	33.575	50.362	44.766
	3	41.968	62.952	67.149	42.808	47.564	53.160	53.160
	$\bar{X} \pm SE$	37.305 ± 4.274^c	54.559 ± 7.789^{ab}	56.890 ± 8.993^a	37.585 ± 4.660^{de}	40.103 ± 7.041^{cde}	49.896 ± 3.521^{abc}	45.232 ± 7.705^{bcde}

表5 土壤理化因子对土壤呼吸强度的通径系数

Tab. 5 Path coefficient of physicochemical factors to soil respiration rate

		$X_1 \rightarrow U$	$X_2 \rightarrow U$	$X_3 \rightarrow U$	$X_4 \rightarrow U$	$X_5 \rightarrow U$	$X_6 \rightarrow U$
土壤呼吸强度 soil respiration rate	X_1	<u>1.445</u>	0.004	-0.012	0.001	-0.050	-0.000
	X_2	0.052	<u>0.124</u>	0.049	0.004	-0.079	0.000
	X_3	-0.107	0.043	<u>0.142</u>	0.008	-0.069	0.004
	X_4	0.065	0.051	0.127	<u>0.009</u>	-0.150	0.004
	X_5	-0.341	-0.046	-0.046	-0.006	<u>0.211</u>	-0.002
	X_6	-0.007	0.011	0.129	0.008	-0.098	<u>0.004</u>

注：有下划的数字表示直接通径系数，其余数字为间接通径系数

Note: The underlined numbers are path coefficients, while the others are indirect ones.

果最好，碱化效果最差；各修复方法综合评价得分由高到低排列依次为干燥后破碎、干燥、施无机氮肥、热熏、改良剂和碱化（图1）。从上述结果来看，不合理的碱化不但不能达到改良的效果，反而会使底泥理化和生物性质恶化。

3 讨论

3.1 土壤呼吸

池塘底泥性质包括理化和生化性质，而与理化性质相比，生化性质所受的重视要小的多，然而土壤生化性质可以反映土壤微生物群落多样性及生物活性，从而更能有效地反映土壤的状况。土壤呼吸是土壤与大气交换二氧化碳的过程，其反映了土壤的生物活性和土壤物质代谢的强度；土壤呼吸也是系统对环境胁迫响应的指标之一^[10]，此外还可以作为环境污染程度和生态系统对污染的承受力的一个判据^[11]。影响陆地土壤呼吸的因素主要是温度和水分等气象因子，其次还有土壤的养分状况、有机质含量、植被类型与地表覆盖、风速及人为活动

造成的土地利用方式改变的影响等^[12]。池塘底泥也具有生物活性体系^[6]，因此，土壤呼吸也可用来判断池塘底泥性质的好坏，土壤呼吸强说明生物活性高，底泥中的有机物质消除速率快，土壤状况好。BOYD 和 PIPPOPINYO^[13]研究了干燥、碱化、翻耕、微生物改良剂和施氮肥对池塘土壤呼吸的影响，认为干燥、碱化、翻耕和施氮肥能不同程度地提高呼吸强度，但微生物改良剂对土壤呼吸强度没有影响。试验中使用了6种不同的修复方法对3口鳊塘底泥进行修复，结果表明，池塘底泥干燥1周后破碎再干燥能很好地提高土壤呼吸强度，这与BOYD 和 PIPPOPINYO^[13]的结果有相似之处。多元回归分析和通径分析表明，对土壤呼吸强度的直接影响力（按绝对值大小）排序依次为 $pH > C/N > \text{有机质} > \text{水分} > TN > TP$ ，而TN和TP对土壤呼吸的影响是通过其他理化因子间接表现出来的。由此可见，要加快土壤有机质消除速度，提高土壤呼吸强度，在池塘修复过程中首先要对池塘的pH进行调整，使其达到最适范围，然后调节有机质和水分等。

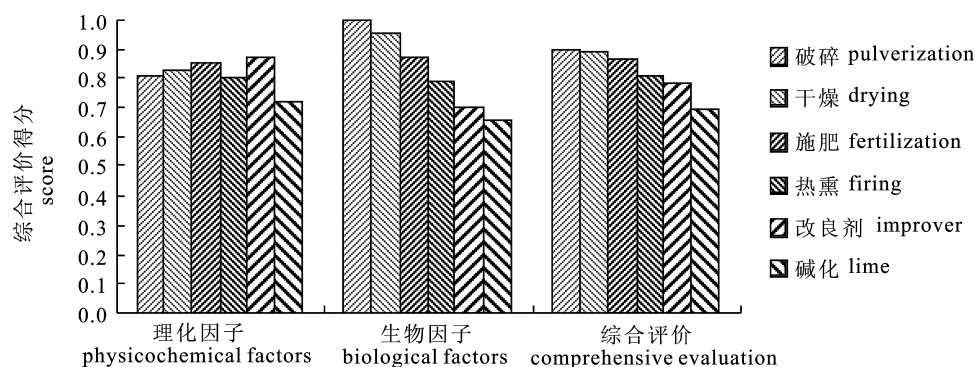


图1 修复方法评价得分

Fig. 1 Score of different restoration methods

3.2 修复方法效果及评价

目前,评价土壤状况的方法主要有综合指数法^[14]、模糊判断、灰色系统聚类^[15]和人工神经网络法^[16]。文章结合相关资料,将评价指标分为一级和二级指标,并采用综合指数法对土壤修复效果进行评价。从各理化因子来看,碱化最能提高土壤pH和可交换性钙含量;热熏可以降低池塘底泥水分;施氮肥可以降低C/N,而热熏可以提高C/N;使用CaO可以显著地提高池塘底泥中可交换性钙;土壤呼吸评价修复效果显示,破碎能较好地提高土壤呼吸强度,其次为干燥。综合评价结果显示,破碎对土壤的整体修复效果最好,碱化修复的整体效果最差。从评价结果来看,生物因子对土壤修复状况的评判和综合评价的结果相似,而理化手段的评判与综合评价有所差别,这间接反映了生物因子比理化因子更能反映土壤状况。试验初步建立了土壤状况综合评价方法,但由于试验所用地评价指标相对较少,尤其是土壤生物性质中的二级指标只用了土壤呼吸一个生化指标。目前,土壤生物性质的评价指标包括土壤酶活力、土壤呼吸强度、土壤生物多样性等^[17],今后对土壤评价应该增加指标,以能更客观地评价土壤状况,进而对土壤修复效果进行评价。

3.3 池塘休耕期间的修复

目前,珠江三角洲在休耕期间对鳊塘修复的主要手段是带水泼洒CaO,少数塘主干塘、晒塘后进行碱化。从试验结果来看,尽管碱化可以提高池塘底泥pH和可交换性钙含量,但若操作不当,不仅使底泥pH和可交换性钙含量过高,同时还影响底泥呼吸强度。另外,还有研究表明,可交换性钙含量过高,可影响底泥中磷元素的释放,因为磷会和钙结合形成磷酸钙沉淀,从而使磷元素得不到合理的利用^[18]。根据试验结果和已有的实践初步提出鳊塘修复程序:

1) 干塘。池塘收获后,将水排干,太阳下暴晒1周左右。

2) 翻耕。应用农业机械对土壤进行翻耕,防止底泥板结,提高土壤的通气性。

3) 样品检测。采土壤样品进行理化分析,并结合结果,选择使用以下措施:碱化,根据检测结果判断池塘是否需要碱化以及碱化需要量;热熏,降低土壤的含水量,进一步促进土壤有机物质

的分解和矿化;施肥,适当补充常量和微量元素。

4) 耙平,压实。应用农业机械,将池塘底泥耙平,并压实。

参考文献:

- [1] KUNTAL M H, ANAND S, DWIVEDI A K, et al. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2007, 119 (1/2): 127-134.
- [2] AVNIMELECH Y, RITVO G. Shrimp and fish pond soils: processes and management [J]. *Aquac*, 2003, 220 (1/4): 549-567.
- [3] NIMRAT S, SUKSAWAT S, MALEWEACH P, et al. Effect of different shrimp pond bottom soil treatments on the change of physical characteristics and pathogenic bacteria in pond bottom soil [J]. *Aquac*, 2008, 285 (1/4): 123-129.
- [4] 林文辉. 池塘养殖底质 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2004.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [6] BOYD C E. Bottom soils, sediment, and pond aquaculture [M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [7] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的CO₂释放 [J]. *生态学报*, 2008, 28 (2): 805-810.
- [8] 沈新强, 袁骥, 王云龙, 等. 长江口、杭州湾附近渔业水域生态环境质量评价研究 [J]. *水产学报*, 2003, 27 (suppl): 76-81.
- [9] 和文祥, 朱铭菽. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析 [J]. *土壤学报*, 1997, 34 (4): 392-397.
- [10] ZHENG Zemei, YU Guirui, FU Yuling, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41 (7): 1531-1540.
- [11] 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展 [J]. *生态学报*, 2001, 21 (2): 315-325.
- [12] 马秀梅, 朱波, 韩广轩, 等. 土壤呼吸研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2004 (6): 491-495.
- [13] BOYD C E, PIPPOPINYO S. Factors affecting respiration in dry pond bottom soils [J]. *Aquac*, 1994, 120 (3/4): 283-293.
- [14] 刘红樱, 谢志仁, 陈德友, 等. 成都地区土壤环境质量初步评价 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24 (2): 297-303.
- [15] 李曰嵩. 长江口生态环境现状综合评价 [D]. 上海: 上海水产大学, 2002.
- [16] 刘够生, 宋兴福, 于建国, 等. 人工神经网络模拟芳基脲土壤吸附系数研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22 (3): 359-363.
- [17] 俞道进. 土霉素残留在模拟池塘生态系统中的消除和转移及对底泥细菌影响的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2003.
- [18] ADHIKARI S. Fertilization, soil and water quality management in small-scale ponds: fertilization requirements and soil properties [J]. *Aquac Asia*, 2003, 8 (4): 11-13.