

养殖水域二氧化碳交换通量计算

吴杭纬¹, 赵泓睿¹, 彭苑媛¹, 桂峰¹, 赵晟^{1*} (浙江海洋大学, 浙江舟山 316000)

摘要 [目的]探讨海-气界面二氧化碳通量。[方法]采用模型估算法,利用实验室模拟条件来培养贻贝进行计算,并且使用 SMART-CHEM 仪器监测出碱度后换算出样品中二氧化碳浓度,酸碱滴定法计算出空气中二氧化碳浓度,从而求得气体交换通量。[结果]贻贝数量增加二氧化碳交换通量越多;培养时间越久,二氧化碳交换通量越多。[结论]该研究为渔业碳汇提供科学依据和技术储备。

关键词 交换通量;二氧化碳;模型估算;养殖水域

中图分类号 S931.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)14-0055-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.14.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Calculation of Carbon Dioxide Exchange Flux in Aquaculture Water Areas

WU Hang-wei¹, ZHAO Hong-wei¹, PENG Yuan-yuan¹ et al (Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316000)

Abstract [Objective] The research aimed to explore the carbon dioxide flux at the sea-air interface. [Method] Using the model estimation method, the laboratory simulation conditions were used to culture the mussels for calculation, and the concentration of carbon dioxide in the sample was calculated by using the SMARTCHEM instrument to monitor the alkalinity, and the carbon dioxide concentration in the air was calculated by the acid-base titration method to obtain the gas exchange flux. [Result] The number of mussels increased, and the carbon dioxide exchange flux increased. The longer the culture time, the more carbon dioxide exchange flux. [Conclusion] The study provides scientific evidence and technical reserves for fishery carbon sinks.

Key words Exchange flux; Carbon dioxide; Model estimation; Aquaculture water areas

温室气体交换通量估算问题已经成为当今热点问题之一,对交换通量的研究已经不仅仅局限于科学研究,还需要各领域科学知识的共同研究发展。随着时代和科学技术的发展,人类面临的环境问题日趋严重,保护和地球迫在眉睫,而温室气体更是全球关注的重点^[1-4]。因为温室气体引起的一系列变化对地球破坏严重,例如全球变暖引起海平面升高备受关注。全球变暖是一种“自然现象”。由于人们焚烧化石矿物以产生能量或砍伐森林并将其焚烧所产生的二氧化碳等多种温室气体,这些温室气体对来自太阳辐射的可见光具有高度的透过性,而对地球反射出来的长波辐射具有高度的吸收性,能强烈吸收地面辐射中的红外线,也就是常说的“温室效应”,导致全球气候变暖。全球碳的循环过程已成为科学家们眼中共同关注的问题。海洋碳循环作为全球碳循环的一部分,其作用极其重要,是涉及全球变化的一个博大命题,其研究的关键在于碳循环的过程与机制^[5],其关键不仅是物理和化学的层面上,还有生物的层面^[6]。被海洋吸收的 CO₂ 经过一系列生物过程(生物泵以及碳酸盐泵的作用)最终以有机物和 CaCO₃ 的形式沉降到海洋底,要经过很长的地质时间才能重新进入大气。生物在海洋碳循环中起非常重要的作用,碳在海洋中的迁移和转化几乎都有生物参与。而人类的活动对生物的种群、结构以及系统都有重大影响。因此,海洋固碳和通量研究成为了全球热点^[7-10]。

浙江近海面积广阔,是海水养殖大省,其中,贝类产量占

海水养殖总产量的 70% 左右。区别于投饵式水产养殖方式,浙江省海水养殖多以贝藻类综合养殖为主,多营养层次综合养殖不仅能够充分发挥养殖海区的空间应用能力,更能有效地促进各营养层次的养殖生物共同健康生长。而在海洋生物固碳这一方面,更是拥有其独特的优势。因此,笔者选取厚壳贻贝作为研究对象,通过实验室分析,研究温度对厚壳贻贝的影响,分析其对近海碳循环产生的影响,加深人类了解近海碳循环的过程,以期在近海贝藻养殖海域生物固碳能力给出评估,为渔业碳汇提供科学依据和技术储备。

1 材料与方法

1.1 研究区域 浙江省舟山市普陀区东极岛附近海域。

1.2 方案设计

1.2.1 养殖模式。选取 12 只体型相似、鲜重相近的新鲜贻贝(200 g 左右)进行海-气界面模拟试验。第 1 天选取 6 只贻贝,将贻贝分为 3 组,分别标记 B、C、D 组。B 组为 1 只贻贝, C 组为 2 只贻贝, D 组为 3 只贻贝。分别放入 3 个相同大小体积的透明塑料桶中,并用绳子系住,避免贻贝粘住容器壁,同时增加一组空白试验组,标记为 A 组。放入完毕后,向每个桶中分别加入等量的海水直至没过贻贝(此次试验加入海水为 7 L)。随后用保鲜膜将塑料桶密封,试验 4 h 后进行采样检测。第 2 天再次选取剩下 6 只贻贝,将贻贝分为 3 组,分别标记 F、G、H 组。同样的 F 组为 1 只贻贝, G 组为 2 只贻贝, H 组为 3 只贻贝,同时增加一组空白试验组标记为 E 组。进行与第 1 天相同的操作,不同的是培养时间改为 8 h, 8 h 后进行采样检测。

1.2.2 采样方案。采集空气时,选取 4 支相同的 20 mL 的针管,插入塑料桶内部快速吸取 20 mL 空气后进行检测。采集水样时,将橡皮管插入水样中,利用洗耳球将水样吸出,进行采集,分别采取 50 mL 水样进行检测。

基金项目 NSFC-浙江两化融合联合基金项目(U1609204);浙江省自然科学基金项目(LY15D060006);国家重点研发计划支持项目(2017YFA0604902);舟山市科技局科技计划项目(2016C41017)。

作者简介 吴杭纬(1994—),男,浙江湖州人,硕士研究生,研究方向:海洋碳循环。*通信作者,教授,博士,硕士生导师,从事海洋生态学研究。

收稿日期 2019-02-27;修回日期 2019-03-11

1.3 实验室碱度的测定 甲基橙在这个方法中被用来作为指示剂,因为它的 pH 范围与对总碱度的等当量点处于相同的范围,并且它有明显地很容易被测量的颜色变化。甲基橙在 pH 3.1 弱缓冲液中正好低于当量点被溶解,所以任何碱度的添加导致颜色直接与碱度的量按比例减少。颜色在 550 nm 波长下测定。

1.4 空气中二氧化碳浓度的测定 空气中二氧化碳浓度的测定有很多种方法,如不分光红外线气体分析法、气相色谱法、生成沉淀法、容量滴定法。此次试验采用的是酸碱滴定法。

1.5 数据处理 第一批贻贝于 4 月 25 日 12:00 放入,16:00 取出,试验历时 4 h,实验室恒温 24 °C,水体温度为 10 °C。第二批贻贝于 4 月 26 日 08:00 放入,16:00 取出,试验历时 8 h,实验室恒温 24 °C,水体温度为 10 °C。

1.5.1 碱度换算。根据数据计算可知 4 月 25 日和 26 日的曲线方程分别为 $Y=0.013\ 57X$ 、 $Y=0.013\ 28X$,根据各个样品的吸光度求出各个样品的碱度(表 1)。

由于所测水样 pH 均小于 8,所以碱度公式为:碱度 = $\text{CO}_3^{2-} + [\text{OH}^-] + [\text{H}_2\text{CO}_3] - [\text{H}^+]$ 。

查表得 H_2CO_3 的电离平衡常数分别为 $K_1 = 4.45 \times 10^{-7}$ 、 $K_2 = 4.69 \times 10^{-11}$ 。

根据计算得知 $C_{\text{water}}[\text{CO}_2] = \frac{\text{碱度} \times [\text{H}^+]}{K_1}$,将各个样品碱度转换为水中二氧化碳浓度(表 1)。

表 1 水中二氧化碳浓度

Table 1 Carbon dioxide concentration in water

样品 Sample	碱度 Alkalinity	pH	$C_{\text{water}}[\text{CO}_2]$ mol/L
A	6.595 4	5.70	2.96×10^{-2}
B	6.886 5	6.26	8.51×10^{-3}
C	6.702 3	6.11	1.17×10^{-2}
D	6.588 1	5.75	2.64×10^{-2}
E	6.871 2	6.20	9.74×10^{-3}
F	6.818 5	6.15	1.08×10^{-2}
G	7.097 1	6.30	7.99×10^{-3}
H	7.240 2	6.40	6.48×10^{-3}

1.5.2 空气中二氧化碳浓度计算。由草酸溶液标定氢氧化钠溶液后,计算出氢氧化钠溶液浓度约为 0.101 mol/L。由已知的 0.101 mol/L 氢氧化钠溶液标定盐酸溶液后,计算出盐酸溶液的浓度约为 0.104 mol/L。各样品消耗盐酸体积见表 2。

所消耗的盐酸溶液 V_2 是用来把所有的 Na_2CO_3 滴定至 NaHCO_3 的,而 Na_2CO_3 是 CO_2 与过量 NaOH 溶液反应的产物。只需要根据将 Na_2CO_3 转换为 NaHCO_3 所消耗的盐酸溶液体积就可以求得需要多少 CO_2 ,从而得到封闭空气中 CO_2 浓度。

根据以下方程式进行求解:



$$\text{所以 } C_{\text{air}}[\text{CO}_2] = \frac{(V_2 - V_1) \text{ mL} \times 10^{-3} \times 1.04 \text{ mol/L}}{20 \text{ mL} \times 10^{-3}}$$

由此公式解出的样品 A~H 空气中的 CO_2 浓度分别为 0.056、0.101、0.151、0.206、0.075、0.170、0.283、0.302 mol/L。

表 2 各样品消耗盐酸体积

Table 2 The volume of hydrochloric acid consumed by each sample

样品 Sample	消耗盐酸(V_1) Consumption of hydrochloric acid	消耗盐酸(V_2) Consumption of hydrochloric acid	$V_2 - V_1$
A	18.88	19.97	1.09
B	17.93	19.87	1.94
C	16.91	19.82	2.91
D	15.87	19.84	3.97
E	18.44	19.88	1.44
F	16.46	19.73	3.27
G	14.36	19.80	5.44
H	13.97	19.78	5.81

1.5.3 二氧化碳通量计算。二氧化碳通量计算的方法如下:

$$F = K(C_{\text{water}} - C_{\text{air}}) \quad (3)$$

K 的计算方法:

$$K = 2.07 + 0.215 \times U^{1.7} \quad (4)$$

式中, U 为测量时风速,因此次试验为实验室养殖,所以风速取值均为 1 m/s。 K 所得结果为 2.285。

根据最终公式^[11-13]可计算出养殖水域海-气界面二氧化碳通量,其中样品 A、B、C、D、E、F、G、H 分别为 -0.060、-0.211、-0.318、-0.410、-0.149、-0.364、-0.628、-0.675 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2 结果与分析

2.1 贻贝数量不同的二氧化碳通量 由表 3 可知,培养 4 h 后水中 pH 呈现出先升高后下降的情况,没有贻贝的空白组(样品 A)是 4 组中 pH 最小的,而培养了 1 个贻贝(样品 B)、2 个贻贝(样品 C)以及 3 个贻贝(样品 D)的水样的 pH 先增大后减小。出现 pH 增加的现象可能是贻贝呼吸作用产生的二氧化碳排放到空气中,而空气中的氧气溶解于水,进行了气体的循环。之后 pH 又持续降低可能是由于贻贝呼吸作用所产生的二氧化碳气体过多,一部分溶于水,一部分排放到了空气中,造成 pH 持续降低的现象。而没有贻贝的空白组(样品 A),pH 最低可能是由于没有发生大量气体交换,只有二氧化碳溶于水,没有消耗氧气以及水中带有的微生物和细菌造成的。而水中二氧化碳气体浓度的变化基本与 pH 变化相反,样品 A 中浓度最高,样品 B、C、D 中是先降低后升高。因为 pH 的变化多数都是由水中二氧化碳浓度决定的。空气中的二氧化碳浓度与水中的二氧化碳浓度则不一样,从样品 A 开始,样品 B、样品 C、样品 D 不断升高。这是由于随着贻贝数量增加,呼吸作用明显加剧,排放到水中和大气中的二氧化碳越来越多,造成了空气中的二氧化碳浓度随着贻贝数量增加越来越高。整个海-气界面的二氧化碳通量变化也是随着贻贝数量增加越来越多。虽然数值本身是越来越小,可

是气体交换是增加的,整个循环也是加剧的。说明贻贝数量越多,二氧化碳交换通量越多。

表 3 不同贻贝数量下的二氧化碳通量

Table 3 Carbon dioxide flux under different mussel numbers

样品 Sample	水中 pH pH in water	$C_{\text{water}} [\text{CO}_2]$ mol/L	$C_{\text{air}} [\text{CO}_2]$ mol/L	交换通量 Exchange flux mg/(m ² ·h)
A	5.70	2.96×10^{-2}	0.056	-0.060
B	6.26	8.51×10^{-3}	0.101	-0.211
C	6.11	1.17×10^{-2}	0.151	-0.318
D	5.75	2.64×10^{-2}	0.206	-0.410
E	6.20	9.74×10^{-3}	0.075	-0.149
F	6.15	1.08×10^{-2}	0.170	-0.364
G	6.30	7.99×10^{-3}	0.283	-0.628
H	5.40	6.48×10^{-3}	0.302	-0.675

由表 3 可知,培养 8 h 后水中的各项指标与培养 4 h 的还是略有差别的。从 pH 角度来说,pH 按照样品 E、F、G、H 是先减小后增大再减小的现象。样品 F 中 pH 减小可能是由于时间的累积,呼吸作用所产生的二氧化碳越来越多,溶解于水的部分比到空气中的部分多所造成的。而样品 F 和 G 中 pH 持续走高可能是由于塑料瓶中氧气已经消耗殆尽,无法再进行呼吸作用造成的。水中二氧化碳的浓度也是随着 pH 不断变化,先升高后下降再升高。空气中二氧化碳浓度则是不断升高,原因应该是随着贻贝数量的增加呼吸作用产生的二氧化碳越来越多,也有越来越多的二氧化碳被排放到空气中。海-气界面的二氧化碳通量变化也是随着贻贝数量的增加不断增加,虽然数值本身是在减小,可是从试验角度上来说则是增加的。

2.2 贻贝培养时间不同的二氧化碳通量 在没有贻贝时,培养 8 h 后水样的 pH 比培养 4 h 的要高,说明随着时间的积累,样品虽然没有贻贝进行呼吸作用,但是由于一些微生物和细菌的影响,对水体的 pH 还是有影响的。水体中的二氧化碳浓度也是随着时间的增加而降低的。空气中的二氧化碳浓度随着时间的增加而升高,但是变化不明显,极其微弱。总的二氧化碳通量也是随着时间的积累增加。

在同样培养 1 个贻贝时,随着时间的增加水体中 pH 呈现减小的趋势,说明水体中二氧化碳浓度升高。是因为随着时间的积累,贻贝的呼吸作用产生的二氧化碳越来越多,使水体的酸度增加,降低了 pH。空气中的二氧化碳浓度也是随着呼吸作用不断升高。最终形成的二氧化碳通量是随时间的增加而增多的。

在同样培养 2 个贻贝时,培养 8 h 贻贝的水体中 pH 为 6.30,培养 4 h 贻贝水体中 pH 为 6.11,pH 居然增大。以往如果按照正常呼吸作用的原因来说 pH 是不可能增大的,时间越久所产生的二氧化碳必定越多,水体的酸度必定越大,pH 肯定越低。而造成该现象的原因可能是由于密闭环境中贻贝所需要的氧气已经消耗殆尽。其实随着时间的增加 pH 应该是越来越小,可是由于密闭环境,氧气的量有限,pH 在减小时会由于氧气的消耗完毕,逐渐由于其他因素产生回升,时间越久 pH 将会越大。而空气中的二氧化碳浓度则不一

样,肯定是随着时间的积累越来越高。整体二氧化碳通量也是随着时间的增加而增多。

在培养 3 个贻贝时,出现的情况其实与 2 个贻贝大致相同。不同之处是,pH 增大的更多,说明在 4 h 时贻贝的呼吸作用所产生的二氧化碳已经快到达峰值。

总体来说,贻贝的培养时间对于水体 pH 的影响还是很大的,但是对于空气中二氧化碳浓度和整体的二氧化碳来说影响不大,都是随着时间的增加而增多。

3 讨论与结论

此次试验采用控制贻贝数量和培养时间 2 个变量进行探讨。其实影响二氧化碳通量的因素还有很多,如水温、气温、辐射以及风速。贻贝数量越多,呼吸作用越明显,所产生的二氧化碳越多,二氧化碳交换通量就越多^[7]。培养时间越久,贻贝进行呼吸作用就越久,所产生的二氧化碳就越多,最终的二氧化碳交换通量也就越多。水温是水体重要的理化参数之一。水温不仅可以影响气体分子的扩散速度及其在水体中的溶解度来直接影响气体交换通量,还可以通过影响微生物的活性来间接影响温室气体产生的地球化学过程。此外,水温还可通过影响水生植物的光合作用及呼吸作用而影响 CO₂ 在水-气界面间的扩散^[2]。气温会对水体内生物呼吸作用以及光合作用产生影响^[14]。而风速将直接影响气体交换以及气体交换速率^[15]。如果辐射越多,一般温度也就越高,阳光也就越强烈^[16],可能对于此次试验影响不大,但是会影响诸多植物的光合作用以及其他气体的交换通量。从试验中可以看出,贻贝数量增加,二氧化碳交换通量越多;培养时间越久,二氧化碳交换通量越多。

国内外对于气体交换通量研究以及方法^[17-19]已有很多,可是都没有很权威的方法,因为实际气体交换通量与监测结果的定量关系还有待进一步研究。气体的交换通量对于人类乃至整个地球都是有划时代意义的。厚壳贻贝不仅是滤食性贝类的典型代表,而且是浙江省近海重要的养殖品种。因此,在自然养殖海域,渔民多根据市场需求,将搭配开展多营养层次综合养殖,分析其对近海碳循环产生的影响,加深人类了解近海碳循环的过程,可望为近海贝藻养殖海域生物固碳能力给出评估,为渔业碳汇提供科学依据和技术储备。事实上,世界发达国家也纷纷将战略重点转向海洋^[20-21],海洋产业已成为全球经济新的增长点,海洋生物资源的开发利用,尤其是海水增养殖业已成为发展海洋经济的重要组成部分^[22]。就我国渔业发展现状来看,发展低碳经济是势在必行的经济愿景,是一个长期、不断实践创新提高的过程。

参考文献

- [1] 蒋增杰,方建光,韩婷婷,等.大型藻类规模化养殖水域海-气界面 CO₂ 交换通量估算[J].渔业科学进展,2013,34(1):50-56.
- [2] 黄文敏,朱孔贤,赵玮,等.香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J].环境科学,2013,34(4):1270-1276.
- [3] 李建鸿,蒲俊兵,孙平安,等.不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究[J].环境科学,2015,36(11):4032-4042.
- [4] 赵登忠,谭德宝,汪朝辉,等.清江流域水布垭水库温室气体交换通量监测与分析研究[J].长江科学院院报,2011,28(10):197-204.

特征。种群危险率随着龄级增加,表现为先增加后降低再增加的趋势,在种群Ⅶ龄级时取得最大值,表明楠木种群在55~<65 cm 龄级时危险率最大,在Ⅶ龄级时,死亡密度最小,表明楠木种群在55~<65 cm 龄级段的生长历程中得到很好的保护和保育。

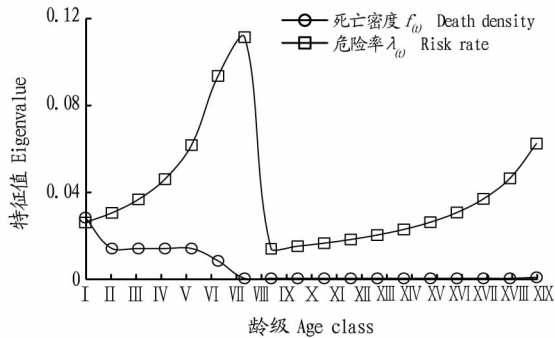


图5 保护区楠木种群死亡密度与危险率

Fig.5 Mortality rate and disappearance rate of *Phoebe zennan* population in the reserve

3 结论

种群动态结构指数显示,0~<5、5~<15 cm 这2个龄级之间,保护区楠木种群为增长型;至15 cm 以后的龄级段间,楠木种群均表现为衰退型。保护区野生楠木种群数量在I~II、Ⅶ~IX、X~XI、XII~XIII、XIV~XV、XVII~XVIII龄级段之间表现逐渐增加,种群数量在II~Ⅶ龄级段之间呈现逐渐减小趋

势,种群数量随着龄级逐渐增加波动较为明显,整体上呈先增加后降低趋势。楠木种群生命期望寿命随着龄级的增加呈现先减小后增加随后又逐渐降低的趋势。楠木种群龄级(Ⅶ~XV)表现出较高的生命期望值,说明此阶段楠木种群的生存质量较高、生理活动旺盛,随着龄级的增加,人为干扰和自生的生物生态学特性限制了楠木的生长,从而导致高龄级的生命期望逐渐减小。

参考文献

- [1] 徐东,袁丛军,李晓芳,等.贵州楠杆自然保护区楠木受胁迫因素与资源保护[J].贵州林业科技,2018,46(4):18-23.
- [2] 傅立国,陈潭清.中国高等植物:第3卷[M].青岛:青岛出版社,2012.
- [3] 姜汉侨.植物生态学[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [4] 王茂师,袁丛军,安明志,等.贵州濒危树种岩生红豆森林群落特征及种群结构[J].西部林业科学,2016,45(1):81-87.
- [5] 张亚芳,李登武,王梅,等.黄土高原不同地区杜松种群结构与动态[J].林业科学,2015,51(2):1-10.
- [6] 袁丛军,杨冰,戴晓勇,等.特有植物厚壳红瘤果茶自然种群生命表及生存力分析[J].江苏农业科学,2016,44(5):275-280.
- [7] 曲仲湘.植物生态学[M].北京:高等教育出版社,1992.
- [8] 陈晓德.植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J].生态学报,1998,18(2):214-217.
- [9] 江洪.云杉种群生态学[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [10] 苏建荣,张志钧,邓疆,等.云南红豆杉种群结构与生命表分析[J].林业科学研究,2005,18(6):651-656.
- [11] 卢杰,潘刚,罗大庆,等.濒危植物急尖苞冷杉种群生命表分析[J].水土保持研究,2010,17(5):212-216,221.
- [12] 汪洋,黄芳,张汉菊,等.珍稀植物红椿种群生命表与生存分析[J].林业调查规划,2017,42(4):17-22.
- [13] 江波,周先容,尚进,等.中国特有植物巴山榧树的种群结构与动态[J].生态学报,2018,38(3):1016-1027.
- [14] 孟宪帅,韦小丽.濒危植物花榈木野生种群生命表及生存分析[J].种子,2011,30(7):66-68.
- [15] GUÉRIN F, ABRIL G, SERÇA D, et al. Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in at tropical reservoir and its river downstream[J]. Journal of marine systems, 2007, 66(1/2/3/4):161-172.
- [16] 李香华,胡维平,杨龙元,等.太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量日变化观测研究[J].生态学杂志,2005,24(12):1425-1429.
- [17] 穆晓燕,崔广柏,杨龙元,等.太湖水-气界面 CO₂ 交换通量观测研究[J].环境科学,2006,27(8):1479-1486.
- [18] 张发兵,胡维平,杨龙元.太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究[J].生态环境,2004,13(2):186-190.
- [19] 蒋滔,郭劲松,李哲,等.三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探[J].环境科学,2012,33(5):1463-1470.
- [20] 王亮,肖尚斌,刘德富,等.香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J].环境科学,2012,33(5):1471-1475.
- [21] WANG W C, YUNG Y L, LACIS A A, et al. Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases[J]. Science, 2000, 194(4266):685-690.
- [22] HUTTUNEN J T, VÄISÄNEN T S, HELLSTEN S K, et al. Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs[J]. Boreal environment research, 2006, 11(20):27-34.
- [23] 杨平,全川.不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展[J].生态学报,2012,32(16):5254-5263.

(上接第57页)

- [5] 刘实,王传宽,许飞.4种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[J].生态学报,2010,30(15):4075-4084.
- [6] 赵炎,曾源,吴炳方,等.水库水气界面温室气体通量监测方法综述[J].水科学进展,2011,22(1):135-146.
- [7] CRILL P M, BARTLETT K B, WILSON J O, et al. Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake[J]. Journal of geophysical research: Atmospheres, 1988, 93(D2):1564-1570.
- [8] SCHLADOW S G, LEE M, HÜRZELER B E, et al. Oxygen transfer across the air-water interface by natural convection in lakes[J]. Limnology and oceanography, 2002, 47(5):1394-1404.
- [9] BANKS R B, WICKRAMANAYAKE G B, LOHANI B N. Effect of rain on surface reaeration[J]. Journal of environmental engineering, 1984, 110(1):1-14.
- [10] HO D T, BLIVEN L F, WANNINKHOF R, et al. The effect of rain on air-water gas exchange[J]. Tellus B, 1997, 49(2):149-158.
- [11] 陈永根,李香华,胡志新,等.中国八大湖泊冬季水-气界面 CO₂ 通量[J].生态环境,2006,15(4):665-669.
- [12] 丁建平,程静,杨建明.溶解性气体对开式循环凝汽器运行特性的影响[J].热力透平,2004,33(1):41-45.