附录:箱式模型海洋箱体地球化学属性微分表达

磷酸盐(PO_4^{3-})

$$\frac{d[PO_4^{3-}_S]}{dt}=\frac{1}{Vol_S}\times$$
$$(\underbrace{((f_{se}+Q_3)\times([PO_4^{3-}_E]-[PO_4^{3-}_S])+f_{si}\times([PO_4^{3-}_I]-[PO_4^{3-}_S])}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{PP_S}_{\text{生产力}})$$

$$\frac{d[PO_4^{3-}_E]}{dt}=\frac{1}{Vol_E}\times$$
$$(\underbrace{f_{se}\times([PO_4^{3-}_S]-[PO_4^{3-}_E])+f_{en}\times([PO_4^{3-}_N]-[PO_4^{3-}_E])}_{\text{洋流,混合作用}}$$
$$+\underbrace{(Q_1+Q_3+f_{ed})\times([PO_4^{3-}_D]-[PO_4^{3-}_E])}_{\text{洋流,混合作用}}+\underbrace{rivPO_4^{3-}}_{\text{河流输入}}-\underbrace{PP_E}_{\text{生产力}})$$

$$\frac{d[PO_4^{3-}_N]}{dt}=\frac{1}{Vol_N}\times$$
$$(\underbrace{((f_{en}+Q_1)\times([PO_4^{3-}_E]-[PO_4^{3-}_N])+f_{nd}\times([PO_4^{3-}_D]-[PO_4^{3-}_N])}_{\text{洋流,混合作用}}-$$
$$\underbrace{PP_N}_{\text{生产力}})$$

$$\frac{d[PO_4^{3-}_I]}{dt}=\frac{1}{Vol_I}\times$$
$$(\underbrace{((f_{si}+Q_3)\times([PO_4^{3-}_S]-[PO_4^{3-}_I])+(f_{id}+Q_2)\times}_{\text{洋流,混合作用}}$$
$$\underbrace{([PO_4^{3-}_D]-[PO_4^{3-}_I])+f_{id}\times([PO_4^{3-}_B]-[PO_4^{3-}_I])}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{g\times(1-rom)\times PP_S}_{\text{再矿化}})$$

$$\frac{d[PO_4^{3-}_D]}{dt}=\frac{1}{Vol_D}\times$$
$$(\underbrace{f_{ed}\times([PO_4^{3-}_E]-[PO_4^{3-}_D])+(f_{nd}+Q_1)\times([PO_4^{3-}_N]-[PO_4^{3-}_D])}_{\text{洋流,混合作用}}$$
$$\underbrace{+f_{id}\times([PO_4^{3-}_I]-[PO_4^{3-}_D])+(Q_2+Q_3+f_{db})\times([PO_4^{3-}_B]-[PO_4^{3-}_D])}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{g\times(1-rom)\times(PP_E+PP_N)}_{\text{再矿化}})$$

$$\frac{d[PO_4^{3-}_B]}{dt}=\frac{1}{Vol_B}\times$$
$$(\underbrace{(f_{db}\times([PO_4^{3-}_D]-[PO_4^{3-}_B])+(Q_2+Q_3+f_{id})\times([PO_4^{3-}_I]-[PO_4^{3-}_B])}_{\text{洋流,混合作用}}$$
$$+\underbrace{(1-g)\times(1-rom)\times(PP_E+PP_N+PP_S)}_{\text{再矿化}})$$

溶解无机碳(DIC)

$$\frac{d[DIC_S]}{dt}=\frac{1}{Vol_S}\times(\underbrace{((f_{se}+Q_3)\times([DIC_E]-[DIC_S])+\cdots]}_{\text{洋流,混合作用}})-$$
$$\underbrace{rcp_{org}\times PP_S}_{\text{POC}}-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_S}_{\text{PIC}}+\underbrace{sol_S\times(p_{CO_{2A}}-p_{CO_{2S}})}_{\text{海气交换}})$$

$$\frac{d[DIC_E]}{dt}=\frac{1}{Vol_E}\times(\underbrace{f_{se}\times([DIC_S]-[DIC_E])+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{rcp_{org}\times PP_E}_{\text{POC}}$$
$$-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_E}_{\text{PIC}}+\underbrace{sol_E\times(p_{CO_{2A}}-p_{CO_{2E}})}_{\text{海气交换}}+\underbrace{W_{car}}_{\text{河流输入}})$$

$$\frac{d[DIC_N]}{dt}=\frac{1}{Vol_N}\times(\underbrace{((f_{en}+Q_1)\times([DIC_E]-[DIC_N])+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-$$
$$\underbrace{rcp_{org}\times PP_N}_{\text{POC}}-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_N}_{\text{PIC}}+\underbrace{sol_N\times(p_{CO_{2A}}-p_{CO_{2N}})}_{\text{海气交换}})$$

$$\frac{d[DIC_I]}{dt}=\frac{1}{Vol_I}\times(\underbrace{((f_{si}+Q_3)\times([DIC_S]-[DIC_I])+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{g\times(1-rom)\times rcp_{org}\times PP_S}_{\text{POC再矿化}}+\underbrace{g\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_S}_{\text{PIC溶解}})$$

$$\frac{d[DIC_D]}{dt}=\frac{1}{Vol_D}\times(\underbrace{f_{ed}\times([DIC_E]-[DIC_D])+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{g\times(1-rom)\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N)}_{\text{POC再矿化}}+$$
$$\underbrace{g\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N)}_{\text{PIC溶解}})$$

$$\frac{d[DIC_B]}{dt}=\frac{1}{Vol_B}\times(\underbrace{f_{db}\times([DIC_D]-[DIC_B])\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{(1-g)\times(1-rom)\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N+PP_S)}_{\text{POC再矿化}}+$$
$$\underbrace{(1-g)\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N+PP_S)}_{\text{PIC溶解}}-\underbrace{Carb_{bottom}}_{\text{深水碳酸盐沉积}})$$

$$\frac{d[p_{CO_2}]}{dt}=\frac{1}{Vatm}\times$$
$$(\underbrace{sol_S\times(p_{CO_{2S}}-p_{CO_{2A}})+sol_E\times(p_{CO_{2E}}-p_{CO_{2A}})+}_{\text{海气交换}}$$
$$\underbrace{sol_N\times(p_{CO_{2N}}-p_{CO_{2A}})}_{\text{海气交换}}+\underbrace{DG_{volkerg}}_{\text{火山作用和有机质氧化}})$$

碱度(ALK)

$$\frac{d[ALK_S]}{dt}=\frac{1}{Vol_S}\times\underbrace{((f_{se}+Q_3)\times([ALK_E]-[ALK_S]+\cdots])}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{0.7\times mp_{org}\times PP_S}_{NO_3^-\text{吸收}}-\underbrace{2\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_S)}_{\text{PIC}}$$

$$\frac{d[ALK_E]}{dt}=\frac{1}{Vol_E}\times(\underbrace{f_{se}\times([ALK_S]-[ALK_E]+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{0.7\times mp_{org}\times PP_E}_{NO_3^-\text{吸收}}-\underbrace{2\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_E)}_{\text{PIC}}+$$
$$\underbrace{2\times(W_{car}+W_{sil})}_{\text{河流输入}})$$

$$\frac{d[ALK_N]}{dt}=\frac{1}{Vol_N}\times\underbrace{((f_{en}+Q_1)\times([ALK_E]-[ALK_N]+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+$$
$$\underbrace{0.7\times mp_{org}\times PP_N}_{NO_3^-\text{吸收}}-\underbrace{2\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_N)}_{\text{PIC}}$$

$$\frac{d[DIC_I]}{dt}=\frac{1}{Vol_I}\times(\underbrace{((f_{si}+Q_3)\times([DIC_S]-[DIC_I]+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-$$
$$\underbrace{0.7\times g\times(1-rom)\times mp_{org}\times PP_S}_{\text{硝化作用}}+$$
$$\underbrace{2\times g\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_S)}_{\text{PIC溶解}})$$

$$\frac{d[ALK_D]}{dt}=\frac{1}{Vol_D}\times(\underbrace{f_{ed}\times([ALK_E]-[ALK_D]+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-$$
$$\underbrace{0.7\times g\times(1-rom)\times mp_{org}\times(PP_E+PP_N)}_{\text{硝化作用}}+$$
$$\underbrace{2\times g\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N))}_{\text{PIC溶解}})$$

$$\frac{d[ALK_B]}{dt}=\frac{1}{Vol_B}\times(\underbrace{f_{db}\times([ALK_D]-[ALK_B]\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{2\times Carb_{bottom}}_{\text{深水碳酸盐沉积}}$$
$$-\underbrace{0.7\times(1-g)\times(1-rom)\times mp_{org}\times(PP_E+PP_N+PP_S)}_{\text{硝化作用}}+$$

$$\underbrace{2\times(1-g)\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E+PP_N+PP_S)}_{\text{PIC溶解}}$$

碳同位素($\delta^{13}C$)

$$\frac{d\delta^{13}C_S}{dt}=\frac{1}{Vol_S}\times\underbrace{((f_{se}+Q_3)\times(\delta^{13}C_E-\delta^{13}C_S)+\cdots])}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{rcp_{org}\times PP_S\times(\delta^{13}C_S+\varepsilon_p)}_{\text{POC同位素分馏}}-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_S\times\delta^{13}C_S}_{\text{PIC}}+\underbrace{ffdp\times slo_S\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2S}}\times(\delta^{13}C_S+\varepsilon_{sa}))}_{\text{海气交换同位素分馏}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_E}{dt}=\frac{1}{Vol_E}\times\underbrace{(f_{se}\times(\delta^{13}C_S-\delta^{13}C_E)+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{rcp_{org}\times PP_E\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_p)}_{\text{POC同位素分馏}}-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_E\times\delta^{13}C_E}_{\text{PIC}}-\underbrace{carbsh\times\delta^{13}C_E}_{\text{浅水碳酸盐沉积}}+\underbrace{W_{car}\times\delta^{13}C_{riv}}_{\text{河流输入}}+\underbrace{ffdp\times slo_E\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2E}}\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_{sa}))}_{\text{海气交换同位素分馏}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_N}{dt}=\frac{1}{Vol_N}\times\underbrace{((f_{en}+Q_1)\times(\delta^{13}C_E-\delta^{13}C_N)+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}-\underbrace{rcp_{org}\times PP_N\times(\delta^{13}C_N+\varepsilon_p)}_{\text{POC同位素分馏}}-\underbrace{rainratio\times rcp_{org}\times PP_N\times\delta^{13}C_N}_{\text{PIC}}+\underbrace{ffdp\times slo_N\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2N}}\times(\delta^{13}C_N+\varepsilon_{sa}))}_{\text{海气交换同位素分馏}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_I}{dt}=\frac{1}{Vol_I}\times\underbrace{((f_{si}+Q_3)\times(\delta^{13}C_S-\delta^{13}C_I)+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+\underbrace{g\times(1-rom)\times rcp_{org}\times PP_S\times(\delta^{13}C_I+\varepsilon_p)}_{\text{POC再矿化}}+\underbrace{g\times rainratio\times rcp_{org}\times PP_S\times\delta^{13}C_I}_{\text{PIC溶解}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_D}{dt}=\frac{1}{Vol_D}\times\underbrace{(f_{ed}\times(\delta^{13}C_E-\delta^{13}C_D)+\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+\underbrace{g\times(1-rom)\times rcp_{org}\times(PP_E\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_p)+PP_N\times(\delta^{13}C_N+\varepsilon_p))}_{\text{POC再矿化}}+\underbrace{g\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_p)+PP_N\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_p)))}_{\text{PIC溶解}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_B}{dt}=\frac{1}{Vol_B}\times\underbrace{(f_{db}\times(\delta^{13}C_D-\delta^{13}C_B)\cdots}_{\text{洋流,混合作用}}+\underbrace{(1-g)\times(1-rom)\times rcp_{org}\times}_{\text{POC再矿化}}\underbrace{PP_E\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_p)+PP_N\times(\delta^{13}C_N+\varepsilon_p)+PP_S\times(\delta^{13}C_S+\varepsilon_p))}_{\text{POC再矿化}}+\underbrace{(1-g)\times rainratio\times rcp_{org}\times(PP_E\times\delta^{13}C_E+PP_N\times\delta^{13}C_N+PP_S\times\delta^{13}C_S)}_{\text{PIC溶解}}-\underbrace{Carb_{bottom}\times(Vol_E\times\delta^{13}C_E+Vol_N\times\delta^{13}C_N+Vol_S\times\delta^{13}C_S)/Vol)}_{\text{深水碳酸盐沉积}}$$

$$\frac{d\delta^{13}C_A}{dt}=\frac{1}{Vatm}\times\underbrace{(-ffdp\times(sol_S\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2S}}\times(\delta^{13}C_S+\varepsilon_{sa}))+}_{\text{海气交换同位素分馏}}\underbrace{sol_E\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2E}}\times(\delta^{13}C_E+\varepsilon_{sa}))+}_{\text{海气交换同位素分馏}}\underbrace{sol_N\times(p_{CO_{2A}}\times(\delta^{13}C_A+\varepsilon_{as})-p_{CO_{2N}}\times(\delta^{13}C_N+\varepsilon_{sa})))+}_{\text{海气交换同位素分馏}}\underbrace{DG_{vol+kero}\times\delta^{13}C_{vol+kero}}_{\text{火山作用和有机质氧化}}$$

附表 1　模型生物地球化学参数

Table S1　List of parameters for biogeochemical model

参数	描述	数值	来源
rcp_{org}	有机质吸收 C、P 的比例生物吸收总 C、P 的比例	106	Ridgwell，2001
$r_{C:P}$	(POC+PIC)	$r_{Corg:p}/(1-\text{rainratio})$	Ridgwell，2001
rnp_{org}	有机质吸收 N、P 的比例	16	Ridgwell，2001
$r_{ALK:P}$	ALK 与 P 的比例	$2\times\text{rainratio}\times r_{Corg:p}\quad-0.7\times r_{N:P}$	Ridgwell，2001
g	箱体“I”和“D”中 POC 和 PIC 的溶解比例	0.5	Toggweiler，2008
rom	POC 沉积比例	0.01	本研究
$DG_{vol+kero}$	火山与沉积物氧化释放 CO_2	7.78×10^{12} mol/a	本研究
P_v	海—气交换的活塞速度	3 m/d	Toggweiler，2008
ε_p	有机碳碳同位素分馏	−23‰	本研究
$\delta^{13}C_{riv}$	河流输入碳同位素组成	−5‰	本研究
$\delta^{13}C_{vol+kero}$	火山与沉积物氧化释放 CO_2 的碳同位素组成	−5‰	Kump and Arthur，1999
$riv\text{PO}_4^{3-}$	河流输入的磷酸盐	2.5×10^{10} mol/a	本研究