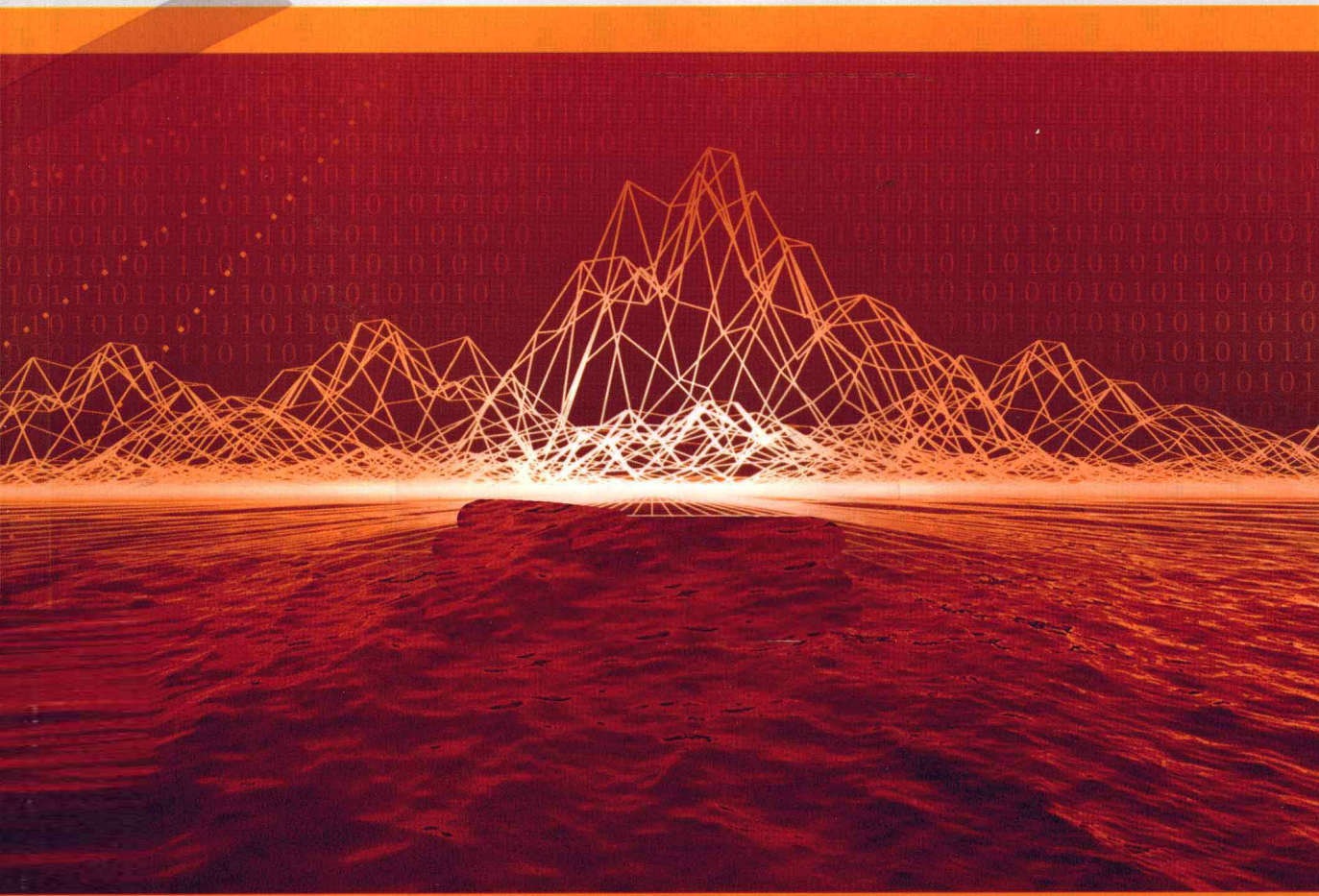


The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology

15

数学模型在生态学 的应用及研究

杨东方 苗振清 编著



 海军出版社

中国生态学会
中国生态学会
中国生态学会

15

数学模型在生态学 的应用研究

—— — —

中国生态学会

数学模型在生态学的应用及研究(15)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(15)

杨东方 苗振清 编著

海洋出版社

2011年·北京

内 容 提 要

通过阐述数学模型在生态学的应用和研究,定量化的展示生态系统中环境因子和生物因子的变化过程,揭示生态系统的规律和机制以及其稳定性、连续性的变化,使生态数学模型在生态系统中发挥巨大作用。在科学技术迅猛发展的今天,通过该书的学习,可以帮助读者了解生态数学模型的应用、发展和研究的过程;分析不同领域、不同学科的各种各样生态数学模型;探索采取何种数学模型应用于何种生态领域的研究;掌握建立数学模型的方法和技巧。此外,该书还有助于加深对生态系统的量理解,培养定量化研究生态系统的思维。

本书主要内容为:介绍各种各样的数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、水文和水动力以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。

本书适合气象学、地质学、海洋学、环境学、生物学、生物地球化学、生态学、陆地生态学、海洋生态学和海湾生态学等有关领域的科学工作者和相关学科的专家参阅,也适合高等院校师生作为教学和科研的参考。

图书在版编目(CIP)数据

数学模型在生态学的应用及研究. 15/杨东方, 苗振清编著. —北京:海洋出版社, 2011. 6
ISBN 978-7-5027-8002-9

I. ①数 II. ①杨… ②苗… III. ①数学模型-应用-生态学-研究 IV. ①Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 074007 号

责任编辑:方 菁

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:20.5

字数:580 千字 定价:60.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《数学模型在生态学的应用及研究(15)》编委会

主 编 杨东方 苗振清

副主编 孙颖颖 丁咨汝 徐焕志 孙天奇 陈 豫

编 委 (按姓氏笔画为序)

冯志纲 白红妍 石 强 孙静亚 张友麓

张宏波 杨丹枫 杨清良 陈 晨 郑 琳

胡 均 赵晓黎 徐大伟 高国瑞 董民辉

数学是结果量化的工具
数学是思维方法的应用
数学是研究创新的钥匙
数学是科学发展的基础

杨东方

要想了解动态的生态系统的基本过程和动力学机制,尽可从建立数学模型为出发点,以数学为工具,以生物为基础,以物理、化学、地质为辅助,对生态现象、生态环境、生态过程进行探讨。

生态数学模型体现了在定性描述与定量处理之间的关系,使研究展现了许多妙不可言的启示,使研究进入更深的层次,开创了新的领域。

杨东方

摘自《生态数学模型及其在海洋生态学应用》

海洋科学(2000),24(6):21-24.

前 言

细大尽力,莫敢怠荒,远迹辟隐,专务肃庄,端直敦忠,事业有常。

——《史记·秦始皇本纪》

数学模型研究可以分为两大方面:定性和定量的,要定性地研究,提出的问题是:“发生了什么?或者发生了没有?”,要定量地研究,提出的问题是“发生了多少?或者它如何发生的?”。前者是对问题的动态周期、特征和趋势进行了定性的描述,而后者是对问题的机制、原理、起因进行了定量化的解释。然而,生物学中有许多实验问题与建立模型并不是直接有关的。于是,通过分析、比较、计算和应用各种数学方法,建立反映实际的且具有意义的仿真模型。

生态数学模型的特点为:(1)综合考虑各种生态因子的影响。(2) 量化描述生态过程,阐明生态机制和规律。(3) 能够动态的模拟和预测自然发展状况。

生态数学模型的功能为:(1) 建造模型的尝试常有助于精确判定所缺乏的知识和数据,对于生物和环境有进一步定量了解。(2)模型的建立过程能产生新的想法和实验方法,并缩减实验的数量,对选择假设有所取舍,完善实验设计。(3)与传统的方法相比,模型常能更好地使用越来越精确的数据,从生态的不同方面所取得材料集中在一起,得出统一的概念。

模型研究要特别注意:(1) 模型的适用范围:时间尺度、空间距离、海域大小、参数范围。例如,不能用每月的个别发生的生态现象来检测1年跨度的调查数据所做的模型。又如用不常发生的赤潮的赤潮模型来解释经常发生的一般生态现象。因此,模型的适用范围一定要清楚;(2) 模型的形式是非常重要的,它揭示内在的性质、本质的规律,来解释生态现象的机制、生态环境的内在联系。因此,重要的是要研究模型的形式,而不是参数,参数是说明尺度、大小、范围而已;(3) 模型的可靠性,由于模型的参数一般是从实测数据得到的,它的可靠性非常重要,这是通过统计学来检测。只有可靠性得到保证,才能用模型说明实际的生态问题;(4) 解决生态问题时,所提出的观点,不仅从数学模型支持这一观点,还要从生态现象、生态环境等各方面的事实来支持这一观点。

本书以生态数学模型的应用和发展为研究主题,介绍数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、气象、水文和水动力,以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。认真掌握生态数学模型的特点和功能以及注意事项。生态数学模型展示了生态系统的演化过程和生态数学模型预测了自然资源可持续利用。通过本书的学习和研究,促进自然资源、环境的开发与保护,推进生态经济的健康发展,加强生态保护和环境恢复。

本书是在浙江海洋学院出版基金、浙江海洋学院承担的“舟山渔场渔业生态环境研究与污染控制技术开放”和“近海水域预防环境污染养殖模型”项目以及国家海洋局北海环境监测中心主任科研基金——长江口、胶州湾、浮山湾及其附近海域的生态变化过程(05EMC16)的共同资助下完成。

此书得以完成应该感谢北海环境监测中心崔文林主任和上海海洋大学的李家乐院长;还要感谢刘瑞玉院士、冯士侬院士、胡敦欣院士、唐启升院士、汪品先院士、丁德文院士和张经院士。诸位专家和领导给予的大力支持,提供的良好的研究环境,成为我们科研事业发展的动力引擎。在此书付梓之际,我们诚挚感谢给予许多热心指点和有益传授的其他老师和同仁。

本书内容新颖丰富,层次分明,由浅入深,结构清晰,布局合理,语言简练,实用性和指导性强。由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,望广大读者批评指正。

沧海桑田,日月穿梭。抬眼望,千里尽收,祖国在心间。

杨东方 苗振清

2010年11月1日

目次

LAI 升尺度转换误差的计算	(1)
岸边带的植被演替模型	(4)
土地利用的指数计算	(7)
农田管理的模糊 c - 均值聚类法	(9)
集合种群的生态位模型	(11)
辽东栎种群的格局指数计算	(14)
阔叶红松林的空间点格局计算	(16)
模糊物元的评价模型	(18)
栖息地的元胞自动机模型	(21)
区域生态的安全预警指数计算	(24)
生态系统功能价值的评估模型	(27)
悬浮颗粒物浓度的计算	(31)
土壤动物群落的指数计算	(33)
城市生态的竞争力指数	(35)
城市化的生态模型	(37)
大型溞的增长率计算	(40)
“网状”的生态指标体系	(41)
农业绿色 GDP 的核算公式	(44)
农业的养分利用模型	(47)
封山育林措施实施效果的评价指标体系	(49)
生态空间的元胞自动机模型	(54)
FACE 系统的水稻生育期模型	(57)
土地生态适宜性评价模型	(62)
林下植被的生物量模型	(65)
土壤容重的计算	(67)
土壤硝态氮的计算公式	(69)
草原产草量的计算	(70)
森林 - 草原交错区的景观格局动态模型	(73)
中国生态足迹的动力学预测模型	(77)

河溪生态的模糊概率评价	(79)
景观生态的风险指数计算	(82)
马鹿冬季生境的 Logistic 模型	(85)
西湖叶绿素 a 的小波神经网络模型	(87)
森林生物量计算	(91)
城市生态安全的空间模糊综合评价	(93)
湿地生态的承载模型	(97)
森林植被的坡面流水运动方程	(99)
土壤食物网的面向过程模型	(102)
西花蓟马的发育公式	(106)
植物分布格局的计盒维数公式	(108)
中值温度的计算	(110)
禽栖息地的评价模型	(113)
森林水源的涵养量公式	(115)
植物抗寒性的电阻抗图谱模型	(117)
人口环境消费的模型	(121)
大型无脊椎动物的耐受值计算	(124)
健康风险评价模型	(127)
旅游生态足迹的模型	(129)
球等鞭金藻生长速率与营养盐的模型	(133)
区域生态经济系统的协调函数	(135)
农田土壤肥力的指数计算	(137)
灾变规律的关键时公式	(139)
文昌鱼资源量的计算	(141)
南瓜低温胁迫后的伤害计算	(143)
大气污染指数的计算	(145)
景观指数的计算	(147)
植物物种多样性的计算	(149)
森林景观的格局公式	(151)
有机物分解的非线性模型	(153)
农户经济决策公式	(155)
农业产业结构的优化模型	(157)
土地资源生态安全值的计算	(160)
生态系统弹性力指数的计算	(162)

喀斯特农业生态系统的评价公式	(164)
根系养分吸收的动力学模型	(167)
水土保持价值的计算	(170)
红壤旱地效益指标的计算	(173)
棉田害虫的群落动态公式	(175)
桂圆多糖含量的计算	(178)
行道树的生态效应公式	(180)
作物的能量产出公式	(182)
农田污水灌溉的正负效应价值计算	(184)
土地利用生态服务价值的计算	(187)
作物水分利用的公式	(189)
江蓠日生长率的计算	(191)
植物种群的生态位计算	(193)
土地利用的变化模型	(195)
地下水使用的生态经济计算	(197)
作物产量的潜力模型	(199)
煤矿区生态环境质量的评价公式	(202)
根系生理指标的计算	(206)
土壤水分的时空分布模型	(208)
森林景观资源的承载指数	(210)
土地利用结构的时空变化公式	(213)
太行山片麻岩区的景观格局公式	(215)
方斑东风螺遗传多样性的计算	(217)
西葫芦叶片的气孔计算	(219)
重庆市的生态足迹计算	(221)
小麦秸秆分解指标的计算	(223)
球等鞭金藻的变速流加模型	(226)
土壤有机碳的指数计算	(228)
降雨径流产沙的相对误差	(230)
降雨均匀系数	(232)
年土壤流失厚度	(234)
植被蒸散量的计算	(237)
景观空间格局的指数	(239)
农田沟垄微型集雨水量的计算	(241)

降水量相对变化率	(243)
土壤盐分平衡	(245)
树干流量的计算	(247)
坡面侵蚀的动力方程	(249)
叶绿素 a 含量的计算	(252)
土壤抗蚀性指标	(254)
土壤氮的空间 Kriging 插值	(256)
土壤磷吸附的动力学方程	(258)
海涂围垦区土壤盐分的时空变异性	(260)
土壤水分平衡公式	(263)
土壤分离速率计算	(265)
黄土高原流域的水量平衡模型	(267)
农田保持土壤量的计算	(269)
蓄水坑灌的径流计算	(271)
水质的模型	(273)
土壤重金属污染的评价公式	(275)
土壤水分特征的分形模型	(277)
土壤重金属污染程度的评价方法	(280)
土壤水分的时间序列公式	(282)
坡面径流的冲刷公式	(284)
磷酸钙的溶出率	(286)
膜下滴灌棉花水分平衡	(288)
马尾松林土壤的抗蚀性计算	(290)
土壤粒径的指标计算	(292)
金属的生物毒性效应计算	(294)
土壤的渗透性公式	(296)
土壤全氮含量的计算	(298)
坡面水流细沟的摩阻流速公式	(300)
反演地表通量的热量平衡模型	(302)
土地资源评价的加权函数	(305)
土壤水盐空间的自相关公式	(307)
黄土地区的水窖计算	(309)
海洋微藻的光衰减模型	(311)

LAI 升尺度转换误差的计算

1 背景

随着遥感技术的发展,如何有效整合不同分辨率数据以达到最高效的利用,越来越受到人们的重视,这涉及遥感尺度转换问题。尺度问题的研究已经成为国内外研究的热点和前沿问题,Mayaux 等^[1]通过 4 种空间指数修正 TM 数据与 AVHRR 数据之间的统计关系,运用两步式的转换方法进行了植被指数的尺度转换。Gao 等^[2]用傅里叶变换和传感器的点扩散函数,将 MODIS 权重响应函数直接应用到 ETM + 影像频率域。胡少英等^[3]利用纯像元信息建立了两种尺度各覆盖类集总式和分布式 LAI 的统计关系,通过面积加权将 30 m 分辨率 LAI 转换到了 960 m,并用此方法校正了 NASA 发布的全球 1 km MODISLAI 数据产品,取得了很好的结果。以上研究都实现了遥感的升尺度转换,但这些研究普遍没有对尺度转换误差影响因素做全面分析。

张万昌等^[4]以张掖绿洲研究区为例,在定量分析尺度转换误差影响因素的基础之上,提出了一种新的 LAI 升尺度转换方法,将研究区获取的 Landsat TM/ETM + LAI 由 30 m 转换到 900 m,并用此方法校正了 NASA 发布的全球 1 km MODISLAI 数据产品。

2 公式

在对尺度转换误差定量分析的基础上,张万昌等^[4]提出了一种基于纯像元 $NDVI$ 分解的尺度转换方法,900 m 植被指数图是像元内 $NDVI$ 值的均值,均一化过程掩盖了亚像元信息,利用纯像元将 900 m 分辨率 $NDVI$ 值按类进行分解,分解值采用相应覆盖类的公式计算 LAI ,最后再加权平均得到整个像元的 LAI 值。技术流程见图 1。

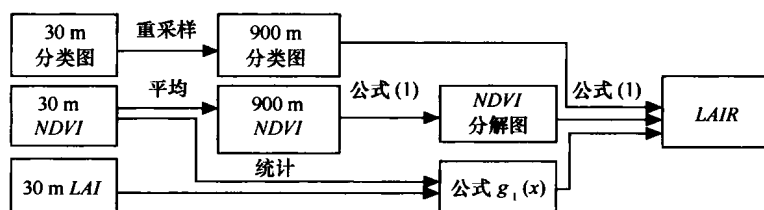


图 1 尺度转换技术流程

$$NDVI_i = \frac{NDVI_i^*}{\sum_{i=1}^m NDVI_i^* w_i} NDVI^{\nabla} \quad (1)$$

$$LAIR = \sum_{i=1}^m g_i(NDVI_i) w_i \quad (2)$$

$$\text{农作物} \quad LAI = 0.752 \times \exp(2.899 \times NDVI) \quad (3)$$

$$\text{阔叶林} \quad LAI = 0.661 \times \exp(2.723 \times NDVI) \quad (4)$$

$$\text{灌木} \quad LAI = 5.111 \times NDVI + 0.244 \quad (5)$$

$$\text{草地} \quad LAI = 5.536 \times NDVI - 0.048 \quad (6)$$

$$\text{针叶林} \quad LAI = 3.482 \times NDVI + 0.478 \quad (7)$$

$$\text{戈壁、水体} \quad LAI = 0 \quad (8)$$

式中: m 是覆盖类数; $NDVI_i^*$ 是 30 m 分辨率各类纯像元植被指数均值; $NDVI^{\nabla}$ 是粗像元集总式植被指数, 由 30 m $NDVI$ 图均值采样模拟得到; w_i 是各类在粗像元内的面积百分比; $NDVI_i$ 是该粗像元分解出的各覆盖类植被指数, 并据表 1 做了极值限定, 表 1 中的极值是由研究区 30 m $NDVI$ 所有像元统计得到的; $g_i(x)$ 表示各类 LAI 与 $NDVI$ 的统计关系式, 分别为式(3)至式(8), 由小区域 $NDVI$ 图和 LAI 图统计得到; $LAIR$ 是尺度转换后的叶面积指数。

表 1 $NDVI$ 参数

项目	农作物	阔叶林	灌木	草地	针叶林	戈壁水体
$NDVI(j)$	0.632	0.313	0.157	0.247	0.238	0.05
$NDVI(\min)$	0.307	0.01	0.01	0.01	0.01	
$NDVI(\max)$	0.897	0.88	0.625	0.608	0.739	

3 意义

张万昌等^[4]提出的基于 $NDVI$ 像元分解的 LAI 升尺度转换算法, 分两步考虑了地表异质性问题, 很好的实现了研究区 30 m 空间精度 LAI 向 900 m 的尺度转换, 该方法应用于干旱、半干旱的中国西北黑河流域 NASA 发布的 MODISLAI 产品校正, 取得了良好效果。

参考文献

- [1] Mayaux P, Lambin E F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: a two-step correction function for proportional errors due to spatial aggregation. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(1): 1-15.

- [2] Gao X, Huete A R. Validation of MODIS land surface reflectance and vegetation indices with multi-scale high spatial resolution data. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2002(2): 533 – 535.
- [3] 胡少英,张万昌. 黑河及汉江流域 MODIS 叶面积指数产品质量评价. *遥感信息*, 2005(4): 22 – 27.
- [4] 张万昌,钟山,胡少英. 黑河流域叶面积指数 (*LAI*) 空间尺度转换. *生态学报*, 2008, 28(6): 2 495 – 2 503.

岸边带的植被演替模型

1 背景

岸边带是水-陆之间的过渡和缓冲地带,是河流生态系统的重要组成部分。岸边带对拦截径流中的固体颗粒、吸收营养盐、减少入河污染负荷有重要作用。受河流水位季节性波动的影响,岸边带生态系统的变化非常剧烈,而当水库等水工建筑的运行剧烈改变河流的水文情势时,水库下游的岸边带生态系统将受到长期的累积性影响。因此,研究复式河道岸边带植被动态对于受损河流生态修复以及河流开发运行的生态环境影响规避具有重要意义。叶飞等^[1]通过原位样方观测和室内水槽模拟试验,开发了岸边带植被演替模型,该模型耦合了全局基于连续性模式的水动力模块和局部基于元胞自动机模式的植被演替模块,并以漓江中游的一段复式河道为例,通过模拟水库运行前后长序列的水文情势变化和3种岸边带植物(刺果酸模、水蓼和益母草)的生长演替,分析了为满足旅游航道需求上游水库补水运行对下游岸边带植被的影响。

2 公式

岸边带生态系统的关键要素包括水流、地形和植被,这些环境因子和生物因子紧密联系且相互作用。为了模拟各个过程及其相互关系,开发的耦合模型结构如图1所示,其中“全局影响”是指由自然或人为因素带来的外部作用力,如气候变化、水流调节等。耦合模型中,水流条件采用二维水动力模型进行模拟:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + Mx \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + My \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = Q \quad (4)$$

式中: ω 为垂向流速(ms^{-1}); f 为科里奥利参数(ls^{-1}); v_v 为垂向涡黏度(m^2s^{-1}); P_x, P_y 为静水压力梯度($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$); F_x, F_y 为 x 和 y 方向上的湍流动量通量(ms^{-2}); Mx, My 为 x 和 y