

文章编号 : 1004 - 7271(2003)04 - 0313 - 06

养殖水域水面冷却对流过程的数值实验

章守宇, 朱惠臣

(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

摘要 : 以简单矩形水域为例, 利用数值实验方法, 定量探讨了具有自由水面的养殖水域由于水面冷却而引起的对流演变的过程。考虑湖泊等养殖水域的流速、水深等特征值的一般大小, 数值计算中的 Re 、 Gr 、 Pr 分别取为 8000、500000 和 10。计算结果显示, 水面冷却对流可分为对流发生、发展和稳定三个阶段, 各阶段流场及温度场的演变规律均受水面有效势能分配于扩散及对流的热输送比例变化的影响, 并形成与之相对应的对流涡、温度等值线的分布特征。水面冷却对流最终形成与水深相当的大对流涡, 温度等值线由对流发生当初的水平等值线几乎完全变成垂直等值线, 上下层水得到充分交换。

关键词 : 养殖水域 ; 水面冷却 ; 对流过程 ; 数值实验

中图分类号 : S911 文献标识码 : A

A numerical experiment of convection course driven by surface cooling in aquatics waters

ZHANG Shou-yu, ZHU Hui-chen

(Ocean College of Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract : Based on a numerical experiment carried out with a simple rectangular water area as an example, the paper discussed the developing progress of convection driven by surface cooling in aquatics waters with free surface quantitatively. In view of the common characteristics of velocity, depth and other given values in lake and other aquatic waters, the values of Re , Gr , Pr could be taken of 8000, 500000 and 10 respectively. The result shows that the convection driven by surface cooling could be subdivided into three phases, i. e. the occurring phase, the developing phase and the steady phase. The development of fields of the velocity and temperature at different phases is affected by rates of the effective potential energy distributed to the diffusing and heat transporting, with convectional eddies and isotherms being formed at the same time correspondingly. Big convectional eddies were brought out by the convection driven by surface cooling, with the magnitude of their diameters being equal to the depth at the end; the distribution of isotherms changed from horizontal form at the beginning to the vertical at the end, so that the water is exchanged fully from surface to the bottom.

Key words : aquatics waters ; surface cooling ; convection course ; numerical experiment

水面冷却对流指由于气温下降等原因使得表层水受到冷却、密度增大, 从而发生自上而下的垂直运动。水面冷却对流广泛存在于湖泊、闭锁性内湾等养殖水域, 并通过对流引起的水体上下交换, 起到促

进表层水富含的溶解氧向底层输送、以及加速底层有机物的分解等作用^[1]。因此,研究水面冷却对流的发生机制、成长过程及与之对应的对流规模大小等,对于定量把握养殖水域的溶解氧等环境因子的季节变动规律等具有重要的意义。本文利用数值实验方法,以矩形封闭、具有自由水面的养殖水域为例,对水面冷却对流的发展过程进行模拟,同时计算其温度场、流场的变化等,以期为探讨水面冷却对流的规模大小,以及将来可能进行的诸如采用水面撒冰等途径制造人工对流、改善养殖水域环境等提供理论依据。

1 数学模型

1.1 控制方程

考虑具有自由水面的养殖水域,为简化研究问题,假设水域边界呈单纯的矩形状。将水面冷却对流看作典型的非牛顿流体流动及其热输送问题^[2],则垂直二维 $x-z$ 平面内的对流可以连续方程、运动方程及能量方程表达,即

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$p = p' + \int_z^\zeta \rho_0 g dz \quad (5)$$

式中 u 、 w 分别表示 x 、 z 方向上的流速, t 为时间, ρ 、 μ 分别表示水的密度和粘度, g 为重力加速度, K 为水的热扩散系数, p' 表示压力 p 减去重力后的值, ρ_0 表示对应于基准温度的密度, ζ 为基准坐标。将(5)式代入(3)式,并重新改写 p' 为 p , 则(3)式变成

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - (\rho_0 - \rho)g \quad (6)$$

设 β 为体膨胀系数, 则 $(\rho_0 - \rho)g$ 可写成

$$(\rho_0 - \rho)g = \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (7)$$

其中 $\beta = (\rho_0 - \rho) / [\rho_0 (T - T_0)]$, 将(7)式代入(6)式可得

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \beta (T - T_0) \quad (8)$$

(8)式的最后一项表明,温度及其变化将会对养殖水域流体的垂直运动产生影响,这种影响的大小与水域的上下层温度差成比例,温度差越大则影响流体垂直运动的程度越显著。

1.2 无量纲化

为便于数值计算,对基本式进行无量纲化。对于温度 T , 导入无量纲变量 \tilde{T} , 得

$$T - T_0 = \tilde{T} \Delta T \quad (9)$$

其中 ΔT 为特征温差。进一步引入速度、压力和长度的无量纲变量 \tilde{U} 、 \tilde{p} 、 \tilde{L} 以及时间无量纲变量 $\tilde{t} = \tilde{L} / \tilde{U}$ 等, 对(1)(2)(8)和(4)式进行无量纲化并全部省略 \sim 号, 便可得到无量纲化后的水面冷却对流方程组

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} T \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

其中无量纲数 $Re = lu\rho/\mu$, 表征惯性力克服粘性力的程度; 无量纲数 $Gr = gl^3\rho\Delta\rho/\mu^2$, 表征浮升力作用的相对大小; 无量纲数 $Pr = \nu/\lambda$, 表征动量扩散相对于热能扩散比率^[3]。考虑湖泊等养殖水域的流速、水深等特征值的一般大小, 本研究的 Re 、 Gr 、 Pr 分别取为 8000、500000 和 10。

2 数值计算

2.1 计算网格

计算网格采用非等间距矩形网格, 如图 1 所示。参照河村哲也等^[4]的研究, 计算区域的网格数取 $I \times J = 30 \times 30$ 。为正确反映表、底层以及左、右两侧边界层温度和流速变化大的特征, 根据下式

$$z_k = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\exp(a) + 1}{\exp(a) - 1} \cdot \frac{\exp(a(2k-1)) - 1}{\exp(a(2k+1)) + 1} \right) \quad (a = \log \frac{1+b}{1-b}) \quad (14)$$

对计算区域四周边界层附近的计算网格进行了局部的垂向加密。(14)式中的 k 为网格点序号 i 或 j 的对应值, 即 $k = i/I$ 或 $k = j/J$; b 为取值范围满足 $0 < b < 1$ 的加密系数, 越接近 0 网格越集中于边界壁面, 但网格过于集中容易导致计算发散, 由于本研究采用显式解法, 故水平方向取 0.9, 垂直方向取 0.6。

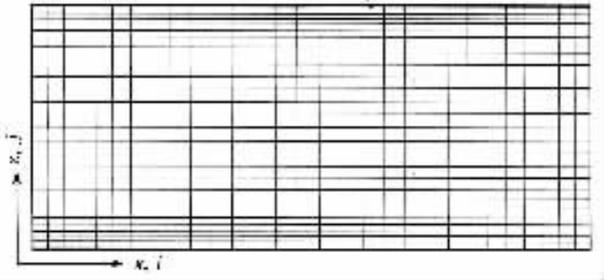


图 1 非等间距计算网格

Fig. 1 Calculation mesh with non-uniform

2.2 控制方程的离散

对于(10)~(13)式分别在时间和空间上进行差分离散。时间上采用向前差分, 即

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} \quad (15)$$

上式中的 f 表示速度或温度, 上标 n 为时间差分号; 空间上采用中心差分, 对于 x 方向的空间差分, 其差分格式为

$$\frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{h_2 f_{i-1}}{h_1(h_1+h_2)} + \frac{(h_2-h_1)f_i}{h_1 h_2} + \frac{h_1 f_{i+1}}{h_2(h_1+h_2)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{2f_{i-1}}{h_1(h_1+h_2)} - \frac{2f_i}{h_1 h_2} + \frac{2f_{i+1}}{h_2(h_1+h_2)} \quad (17)$$

(16)(17)式中, 下标 i 为 x 方向上的差分号; $h_1 = x_i - x_{i-1}$, $h_2 = x_{i+1} - x_i$; x_{i-1} , x_i 和 x_{i+1} 分别表示在计算网格点 $i-1$, i 和 $i+1$ 的 x 坐标。对于 z 方向的空间差分, 其原理与 x 方向一样。

2.3 边界条件

包括水面、水底以及左、右两侧面关于温度、流速和压力的边界值。

2.3.1 温度

水面冷却对流与因表、底层水温差而产生的对流具同等效应, 温度在水面最低、水底最高, 故取水面、水底的温度无量纲值分别为 0 和 1, 即 $T_{i,31} = 0$ 、 $T_{i,1} = 1$ 。

水底及左、右边界均为绝热, 即沿壁面的法向温度梯度为零, 故取 $\partial T / \partial z_{i,1} = 0$ 及 $\partial T / \partial x_{1,j} = \partial T / \partial x_{31,j} = 0$ 。

2.3.2 流速

水面点垂向流速为零,即 $w_{i,31} = 0$,且水面点水平流速垂向无变化,即 $\partial u / \partial z_{i,31} = 0$ 。水底及左、右边界上的流速采用不可滑移条件,即 $u_{i,1} = w_{i,1} = 0$, $u_{1,j} = w_{1,j} = 0$, $u_{31,j} = w_{31,j} = 0$ 。

2.3.3 压力

水面为自由水面,故 $p_{i,31} = 0$ 。两侧壁和底面的压力可近似地认为 $\partial p / \partial x_{1,j} = \partial p / \partial x_{31,j} = 0$ 。

2.4 初始条件

水面温度为 0,其余均取为 1。流速和压力均全体计算区域取为 0。

3 结果与讨论

本研究矩形水域的长宽比取 1:0.4,计算的时间步长取 $\Delta t = 0.01$ 。在表底层温度差维持不变的条件下,水面冷却对流及其热传递的演变过程可分成发生、发展、稳定三个阶段,各阶段具有明显不同的特征。

3.1 发生阶段

自开始至大约 $t = 300$,图 2 显示 $t = 200$ 时刻的温度场和流场,反映了水面冷却对流在发生阶段的流动状态和温度状况的基本特征。由图可知,该阶段垂直方向上的对流十分微弱,水平方向上的移流主要出现在表层附近,其量值一般大于垂直方向,并且局部区域初显约直径为 $1/4 \sim 1/3$ 水深的小尺度对流涡,但遍及全水深尺度的对流涡尚未形成。另一方面,温度等值线均呈水平状,且密集分布于近表层水域,上下分层现象明显。

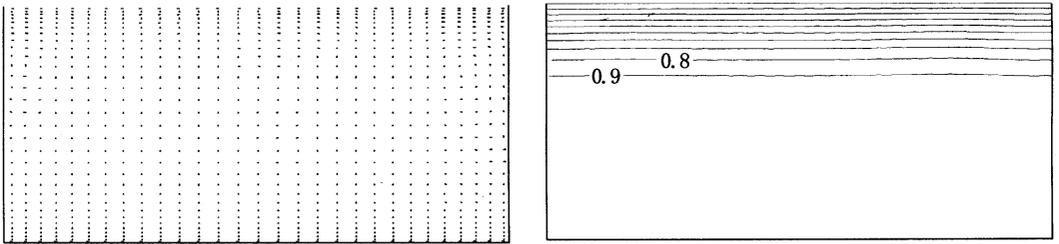


图 2 水面冷却对流发生阶段的流场和温度场 ($t = 200$)

Fig. 2 Fields of velocity and isothermal due to surface cooling convection during generating period ($t = 200$)

自由水面受气温下降而冷却,表层水因此而密度增大并产生相对于水底的、由表底层水温差而决定的有效势能。水面冷却有效势能一部分被垂直方向上进行的扩散所消耗,而另一部分则转化为动能——即垂直对流和水平移流^[5]。由于水面冷却开始之初,水面点的垂直温度梯度最大,因此,其垂直方向的热扩散作用在全体水域中也是最大的,使得水面有效势能在被水平移流输送到对流沉降区域前就扩散掉了,故此时形成的水面有效势能并不能用来驱动对流,整个水域只有水平移流而无垂直对流。之后,由于扩散引起的热交换使得水面点垂直温度梯度逐渐变小的同时,使得用来进行垂直对流的这部分水面有效势能的比例逐渐增大。当 $t = 200$ 时,垂直对流已经发生,并在局部与水平移流共同构成小尺度的对流涡。但这些小涡还很不稳定,其在垂直方向输送热量的作用也是很小的,这种状况持续到大约 $t = 300$ 时刻。因此,在水面冷却对流的发生阶段,垂直方向的热量输送是以扩散形式为主,图 2 的水温等值线均呈水平分布就清楚地说明了这一点。

3.2 发展阶段

大约自 $t = 300$ 至 $t = 3300$,图 3 显示 $t = 400$ 、 $t = 800$ 和 $t = 3000$ 时刻的温度场和流场,分别反映了水面冷却对流发展阶段早期、中期和末期的流速、温度分布特征。

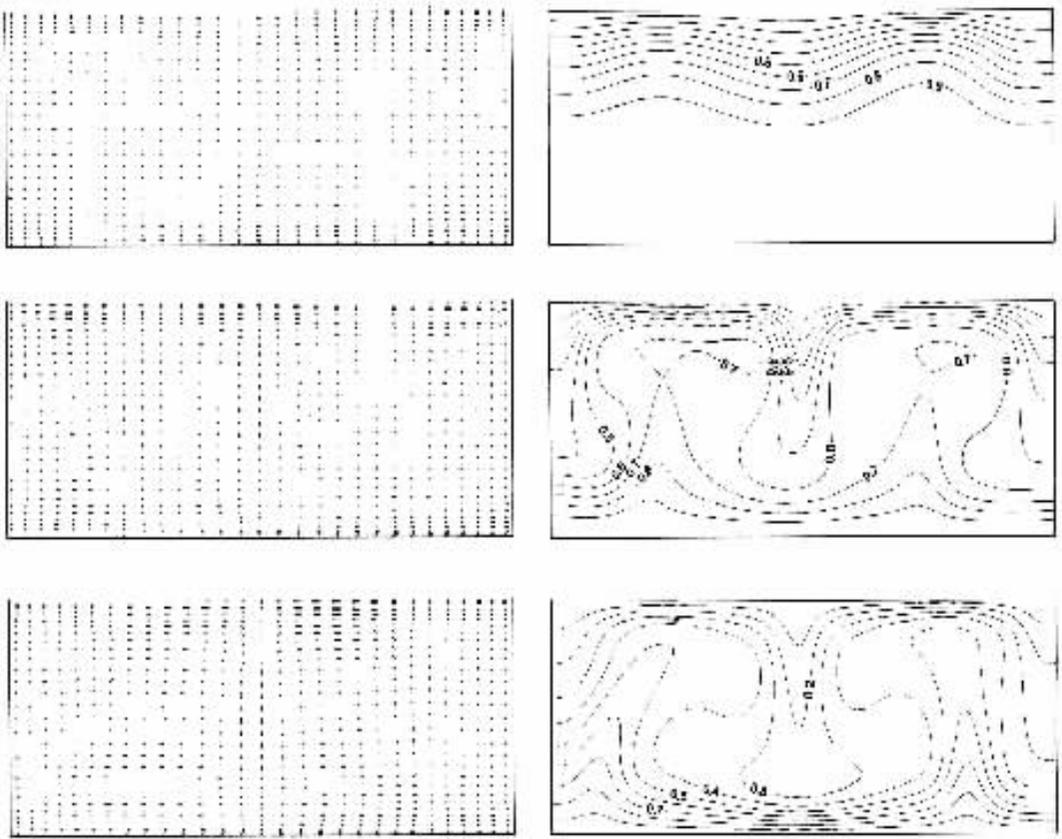


图 3 水面冷却对流发展阶段的流场和温度场

($t = 400, 800, 3000$)

Fig.3 Fields of velocity and isothermal due to surface cooling convection during developing period($t = 400, 800, 3000$)

由图可知,在紧接水面冷却对流经过发生阶段后的发展早期阶段,由于水面点的垂直温度梯度不断减小,水面有效势能用于对流沉降部分的比例进一步增加,又因为驱动沉降对流而使得水平移流规模同时增大,并随即形成 4 个直径为 $1/2$ 水深的中等尺度对流涡。对流涡的数量可能与水域的长宽比、表底层水温差(或 Re 、 Gr 、 Pr 等无量纲数)的大小及计算区域的网格数等有关,但目前只是推测,尚有待于通过另外的数值实验进行确认。与流场图相对应的此阶段的温度场由于垂直对流热输送的影响,其等值线由水平状分布变成为波浪形状平行线,波形的低谷连线与对流沉降区对应,而波峰连线则与上升流区相对应。

发展中期阶段,如图 3 之 $t = 800$ 。尽管对流涡的直径仍为水深的 $1/2$,但由于对流的热输送作用持续增强,故此时垂直对流输送的热能与水平流具有的动能之比例逐渐增大,对流涡的中心也由早期的 $1/3$ 水深处往下移动到 $1/2$ 水深。另一方面,温度场由于对流热输送作用的增强而出现较大变化,温度分层结构基本上被破坏。同时,上升流作为沉降对流的补偿流,将对流热输送而引起的上下混合水向上输运,故在上升流区形成上下均一的温度场。而在沉降流区底层和上升流区表层附近仍未消失的温度分层现象,则是由于数值计算的边界条件所致。

发展末期阶段,随着沉降流区温度垂直梯度的减小,对流的热输送效率减低,但因为水面有效势能不变,故垂直对流的规模得以继续增大,进而促进水平移流的发展。当水平移流的规模超越垂直对流时,两个以水温更为接近的上升流区为界的相邻对流涡便相互合并,向形成直径与水深相当的大尺度对流涡发展。图 3 之 $t = 3000$ 左图只显示了左侧大尺度对流涡的形成,而右侧的大对流涡是在稍后时刻形

成的,这种左右对称对流涡在形成时间上的差异是由于数值计算的方向性及各网格点的累计误差不同所引起的。温度场与发展中期阶段相比,由于对流规模的扩大而使得上升流中心向左右两边界扩展,由此产生的温度均匀区面积进一步更大,同时温度也由中期的0.7下降到0.4。

3.3 稳定阶段

水面冷却对流经过发生、发展阶段而形成直径与水深相当的大尺度对流涡,此后基本上处于该状态,温度场和流场无大变化,故称之为稳定阶段或定常阶段。稳定阶段的起算时刻大约在 $t = 3300$,图4显示 $t = 5000$ 时刻的温度场和流场。由图可知,矩形水域最终形成两个直径与水深相当的大对流涡,左右完全对称,水域中间为对流沉降区,而左右两侧的边界则形成上升流区。与此相对应的温度场继续保持水面冷却对流发展末期阶段的基本特征,即除水面、水底边界层附近区域外,上下层温度趋于均匀,水面冷却对流发生当初的水平等值线几乎完全为垂直等值线所替代。

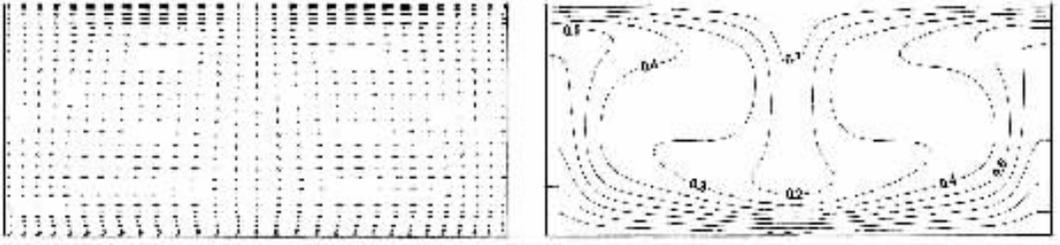


图4 水面冷却对流稳定阶段的流场和温度场($t = 5000$)

Fig.4 Fields of velocity and isothermal due to surface cooling convection during steady period($t = 5000$)

4 结语

通过水面冷却引起流速、温度分布特征的变化数值实验,主要得到以下结论(1)水面冷却对流可分为对流发生、发展和稳定三个阶段,各阶段的对流涡、温度等值线具有明显的分布特征。(2)不同对流阶段的流场及温度场的演变规律受水面冷却有效势能分配于扩散热输送和对流热输送比例的变化影响,对流热输送所占比例随深度而增大、随时间而增加。(3)水面冷却对流最终形成与水深相当的大对流涡,温度等值线由对流发生当初的水平等值线几乎完全变成垂直等值线,上下层水得到充分交换。

本文利用数值实验方法,简单地以矩形的养殖水域为对象,通过水面冷却对流引起的流速、温度分布特征的变化研究,定量探讨了渔业水域冬季对流的发生、发展过程以及其成长机制。今后的课题是在此基础上针对具有一般地形特征的养殖水域如半圆形底湖泊等,计算由于水面冷却而产生的垂直对流量大小,及其由于上下对流混合所引起的养殖水域底质环境改善的程度等,并进一步探讨与该种程度养殖水域环境改善相对应的水面冷却能量的大小,为将来通过诸如水面撒冰等途径来制造人工对流、改善养殖水域环境等提供理论依据。

参考文献:

- [1] 木村晴保,宗景志浩,渡边久芳,等.浦の内湾の環境特性[J].水产土木,1986,22(1):29-40.
- [2] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1987,151-158.
- [3] 宝沢光纪,都田昌之,菊地贤一,等.扩散と移動現象[M].东京:培风馆,1996,78-94.
- [4] 河村哲也.应用数值计算ライブラリ——流体解析[M].东京:朝仓书店,1997,71-72.
- [5] K Akimoto, T Awaji, N Imasato, et al. Open-ocean deep convection in the Weddell Sea: two-dimensional numerical experiments with a non hydrostatic model[J]. Deep-Sea Research I, 1995, 42(1):53-73.