

湿地降温增湿效应的数值模拟研究

李荫堂¹, 李志勇², 方飞¹, 耿永明¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 嘉兴职业技术学院生物环境分院, 314036, 嘉兴)

摘要: 采用数值模拟方法研究湿地对周边区域空气的降温增湿效应, 建立了空气、水气的流动与扩散混合模型, 描述给定空间的传热传质过程. 控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程和水气守恒方程. 对每一相各自的流动, 采用 $k-\epsilon$ 双方程模型; 对于两相的湍流流动, 采用混合湍流模型. 用 FLUENT 软件进行数值计算, 得出给定区域的空气温度、相对湿度的空间分布. 对实测案例进行了数值模拟, 计算值与测定值符合良好, 表明所建立的模型和计算方法可以很好地描述湿地对周边区域空气温度和湿度的影响. 由等温线可以看到, 低温空气的扩散在近湿地处, 影响最大的区域距地面一定高度. 冷空气从湿地边沿向远处及上下扩散, 在温度最低区略有上升, 到一定远处又下降至地面. 对于相对湿度, 在靠近湿地区域水气对地面附近的影响比气温影响明显, 而远处水气对地面附近的影响不及气温影响大.

关键词: 湿地; 降温增湿效应; 数值模拟

中图分类号: P931.7; P463 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0825-04

Numerical Simulation on Cooling and Humidifying Effects of Wetlands

Li Yintang¹, Li Zhiyong², Fang Fei¹, Geng Yongming¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Microbial and Environmental Engineering, Jiaxing Vocational Technology College, Jiaxing 314036, China)

Abstract: A numerical simulation method is used to investigate the cooling and humidifying effects of wetlands. A mixture model was adopted to simulate the flow and diffusion of air and moisture, which describes the process of heat and mass transfer. The governing equations include the continuity equation, the momentum equation, the energy equation and the humidity conservation equation. The turbulent energy equation and the energy dissipation equation are used for each phase, and a mixture turbulence model for the two-phase turbulent flow. The distributions of the air temperature and moisture in the given region were calculated by the FLUENT software. The simulation for a case of the measurements in situ was carried out, and the calculation results agreed well with the field measurements data. From the isotherms, it can be seen that the most effective region of cold air is at a certain height above the ground near the wetland. The cold air diffuses up and down from the wetland edge while the coldest air rises slightly and comes down to the ground at the certain far place. The effect to the relative humidity near the ground is more evident than that of the temperature, and on the contrary, is not remarkable as the temperature at the distant place.

Keywords: wetland; cooling and humidifying effect; numerical simulation

研究湿地的冷湿效应有助于湿地的保护和利用, 以及对湿地生态功能的定量评价. 湿地对区域空

气的降温增湿作用是其生态环境功能之一. 由于湿地巨大的热容量和强烈的水分蒸散, 从而对区域小

气候产生调节作用,该作用与湿地面积、下垫面性质、气象条件等有关。

国内一些研究者对湿地的冷湿效应进行了现场测定研究.高俊琴等^[1-2]在三江平原湿地某试验区,对湿地周围不同距离农田的近地面气温、湿度、地温进行了实测研究,结果表明:湿地冷湿效应主要与湿地的蒸散作用和冷辐射作用相关,而蒸散和冷辐射强度主要取决于下垫面的温度、水分条件和植被类型;湿地冷湿效应与湿地植被及其积水深度有关;距湿地不同距离农田的近地面气温和湿度变化不同,随距离增加,温度上升,湿度减小.张芸等^[3]研究测定了三江平原典型湿地3种植物群落的蒸腾强度,计算出群落范围内湿地植被的降温增湿效应,结果表明,湿地降温增湿效应与湿地植被类型、面积大小有关。

对于湿地降温增湿作用的数值模拟研究报道极少. Robitu 等^[4]对于城市中的一个水池和周围树木,用数值模拟方法研究了它们对周围风速、气温的影响.模型考虑水池和树木对太阳辐射的减弱,计算得出了周围气温的降低状况。

现场测定受多种因素影响和限制,数据有限,难以全面、系统地描述湿地与周围空气热量、水气的传递交换过程.数值模拟方法可以摆脱现场测定的局限,能够方便地给定边界条件,模拟空气和水气的流动混合、传热传质过程并得出结果.数值模拟的突出优点是能够预测规划湿地的作用,可以假定条件,如湿地的下垫面类型、面积、形状和气象条件等,预测由此产生的影响效果。

本文建立了一个空气和水气的流动、扩散、混合、传递模型,以高俊琴等的实测研究为例,模拟湿地与周边空气的作用,得出湿地对周围区域的降温增湿效果。

1 数学物理模型

模拟区域是一个由湿地和农田为下垫面的三维空间(200 m×100 m×10 m).坐标原点取在湿地边界上,离开湿地方向为 x 轴,离开地面高度方向为 z 轴.空气、水气作为流体在此空间中流动、扩散,在边界(入口)条件作用下,形成一定的流速、气温、水气浓度的空间分布.下垫面或上风(入口)界面进入的流体的温度、水气含量发生变化,这一空间的流体的参数随之变化,因而湿地作为边界条件的一部分,如果发生温度、水气的变化,会随空气流动与湍流扩散,在整个空间不同程度地产生降温增湿效应。

这一空间的流体的流动、扩散过程,以及受边界影响下的气温、水气浓度场的变化,可以用一组偏微分方程来描述.这组控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程和水气守恒方程.给定边界条件,用数值方法求解,可得到相应的速度、温度、相对湿度的空间分布。

本模拟采用的数学物理模型称为混合模型.空气、水气在研究区域的运动模拟为两相气体流动、混合.在划分的三维网格的每一微元体中,两相流体可以互相渗透,其中一相的体积份额可取 0~1 之间的任何值.两相速度可以不相等,亦即可以存在相间滑移.对于一个微元体中的各个变量,以及表征微元体的特性参数,取各相的体积平均值.因此,对于任何一个微元体,其中的流体可以是一相,也可以是两相.比如,空气的体积份额有3种可能: $\alpha_1=0$; $\alpha_1=1$; $0<\alpha_1<1$.

混合模型的数学描述如下。

(1)混合物连续方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}_m$ 是质量平均速度

$$\mathbf{v}_m = \frac{1}{\rho_m} (\alpha_1 \rho_1 \mathbf{u}_1 + \alpha_2 \rho_2 \mathbf{u}_2) \quad (2)$$

ρ_m 是混合物的密度

$$\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (3)$$

其中 α_1 、 α_2 和 ρ_1 、 ρ_2 分别是空气相、水气相的体积份额和密度; $\dot{m}$ 是控制体之间的质量传递。

(2)混合物动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = & -\nabla p + \\ & \nabla \cdot (\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)) + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \\ & \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}_{dr,2} \cdot \mathbf{v}_{dr,2}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}$ 是体积力; μ_m 是混合物黏度

$$\mu_m = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (5)$$

$\mathbf{v}_{dr,2}$ 是第二相(水气)的漂移速度

$$\mathbf{v}_{dr,2} = \frac{\alpha_1 \rho_1}{\rho_m} \mathbf{v}_{12} \quad (6)$$

其中滑移速度(相对速度) $\mathbf{v}_{12} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$,即第二相(水气)相对于第一相(空气)的速度。

在计算程序中,滑移速度的数学表达式为

$$\mathbf{v}_{12} = \tau_{12} \mathbf{a}$$

式中: $\mathbf{a}$ 是第二相的加速度; τ_{12} 为弛豫时间

$$\tau_{12} = \frac{(\rho_m - \rho_2) d_p^2}{18 \mu_1 f_{drag}} \quad (7)$$

其中 d_p 是作为第二相的气泡或液滴的直径, f_{drag} 是

阻力系数

$$f_{\text{drag}} = \begin{cases} 1 + 0.15Re^{0.687} & Re \leq 1\,000 \\ 0.018\,3Re & Re > 1\,000 \end{cases}$$

加速度的计算式如下

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} - (\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m - \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t} \quad (8)$$

(3)混合物能量方程. 空气温度的求解依据能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \mathbf{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \quad (9)$$

式中: $k_{\text{eff}} = k + k_f$ 是有效传导率, k_f 是湍流热传导率, 由湍流模型确定; $E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2}$ 是能量表达式, 其中 h_k 是 k 相的显焓, 方程右边第一项是能量的扩散传递, 第二项是热源或汇。

(4)水气体积份额方程. 对于第二相水气, 由连续方程可得

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}_m) = - \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}_{\text{dr},2}) \quad (10)$$

(5)湍流模型. 本文对每一相各自的流动, 采用 $k-\epsilon$ 双方程模型; 对于两相的湍流流动, 采用混合湍流模型. 湍流动能 k 和湍动能耗散率 ϵ 的守恒方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (12)$$

式中: 混合物的速度和密度用式(2)、(3)计算。

湍流黏性系数为

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

湍流动能产生项为

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla \mathbf{v}_m + (\nabla \mathbf{v}_m)^T) \nabla \mathbf{v}_m \quad (14)$$

湍流模型 $k-\epsilon$ 方程中的常数见表 1。

表 1 湍流模型 $k-\epsilon$ 方程中的常数

σ_k	σ_ϵ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ
1.0	1.3	1.44	1.92	0.09

2 数值计算方法

本文采用 FLUENT 软件进行数值计算. 根据前面给出的两相流动的控制方程, 首先将方程及计算区域离散化, 将计算区域划分成许多个子区域, 确定每个区域的节点, 生成网格, 然后再将空间上连续变量的控制方程在网格上离散, 将偏微分方程转化为各个节点上的离散方程组, 再在计算机上求解, 得到节点上各欲求变量的解。

有限体积法是近年来发展最为迅速的一种离散化方法, 目前在计算流体动力学领域得到了广泛应用. 本文采用有限体积法进行离散. 区域离散化后, 可以得到节点、控制体积、界面和网格线 4 种几何要素。

本研究对象区域是三维空间, 由此生成的离散方程组含有多个变量, 如果直接求解, 计算量太大以至于无法进行, 必须对离散方程进行某种调整, 并且对各个未知量(速度、压力等)的求解顺序及方式进行特殊处理. 这里采用的算法为 SIMPLE 算法, 该方法通过建立压力修正方程来解决速度耦合问题. 本文采用的是结构网格。

3 数值模拟结果与讨论

本文对高俊琴等^[1]的实测案例进行数值模拟. 高俊琴等进行研究的试验区位于三江平原沼泽湿地生态试验场内, 他们选择小叶章湿地、毛果苔草湿地、漂筏苔草湿地与周围的农田进行对比研究. 在距湿地不同距离(0、20、40、60、80、100 m)的农田, 用阿斯曼表测定 20、40、60、100 cm 高度处气温和湿度的变化. 测试期间天气状况良好, 晴天少云。

本文用前述数理模型和计算方法对湿地附近区域(长 200 m×宽 100 m×高 10 m)进行了数值模拟, 计算得出了空气温度、相对湿度的空间分布. 将对应数据与高俊琴等的实测数据进行比较, 二者具有很好的一致性, 表明本文的数值方法可以很好地模拟湿地对周边空气的降温增湿作用。

3.1 气温分布模拟

数值模拟计算得出了湿地附近的气温分布. 100 m(x 轴方向)之内的计算结果与实测数据的比较见图 1, 图中数值为距地面 1 m 高度内的平均值. 由图可见, 模拟计算结果与高俊琴等的实测结果符合很好, 最大误差点在 20 m 处, 实测值为 16.05 °C, 计算值为 16.41 °C, 误差为 2.3%。

图 2 是垂直切面空气温度等值线, 范围是距离

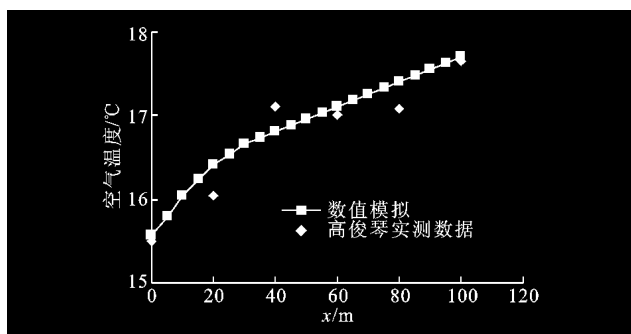


图1 湿地附近气温平均值的模拟结果与实测数据比较

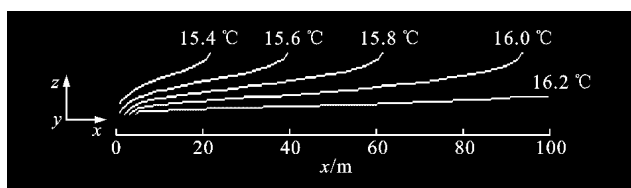


图2 气温分布垂直切面

湿地 0~100 m(x 轴方向), 横向水平方向 y 轴为 0~100 m, 高度方向 z 轴为 0~10 m. 由等温线可以看到, 低温空气的扩散在近湿地处, 影响最大的区域距地面一定高度. 离开湿地一定距离(约 100 m 以外), 影响往地面扩展, 再往远处逐渐消失. 冷空气从湿地边界向远处及上下扩散, 在温度最低区略有上升, 到一定远处又下降至地面.

根据模拟结果, 观察模拟区域水平剖面的气温分布, 可以看到湿地影响下的冷空气在不同高度上向外扩散的程度不同. 取高度为 0.2、0.6 m 的水平剖面为例, 比较可见 0.2 m 处冷空气扩散深远, 其总体气温低于 0.6 m 处的气温.

在高度为 0.2 m 的水平上, 气温分布的模拟结果与实测数据的比较见图 3, 最大误差在 $x=100$ m 处, 模拟值为 17.78 °C, 误差为 2.3%.

3.2 相对湿度分布模拟

数值模拟计算得出了湿地附近空间的空气相对湿度分布. 对于距地面 1 m 高度内的平均值, 将 x 轴 100 m 之内的计算结果与实测数据比较, 如图 4

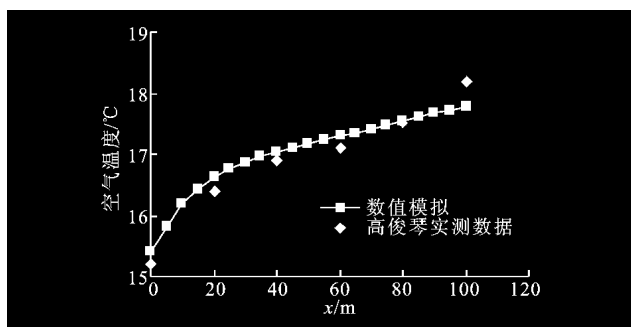


图3 0.2 m 高度处气温的模拟结果与实测数据比较

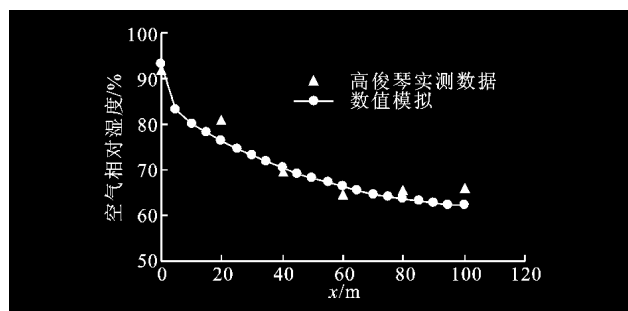


图4 空气相对湿度平均值的模拟结果与实测数据比较

所示. 由图可见, 模拟计算结果与高俊琴等的实测结果符合良好, 最大误差点在 $x=20$ m 处, 实测值为 81%, 计算值为 76.16%, 误差为 6%.

取 x 为 0~100 m 的范围, 高度方向 z 为 0~10 m, 垂直切面空气相对湿度等值线如图 5 所示. 相对湿度与低温空气的分布相似, 但在靠近湿地区域, 水气对地面附近的影响比气温影响明显, 而在远处, 水气对地面附近的影响不及气温影响大.

在高度为 0.2 m 的水平上, 空气相对湿度水平面分布的模拟结果与实测数据的比较如图 6 所示. 由图可见, $x=20$ m 处误差最大, 模拟值为 78.25%, 误差为 -15%.

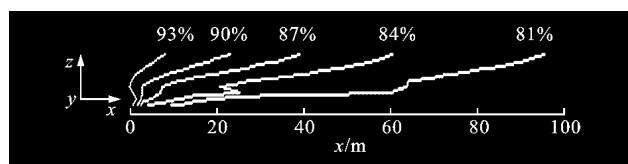


图5 空气相对湿度分布垂直切面

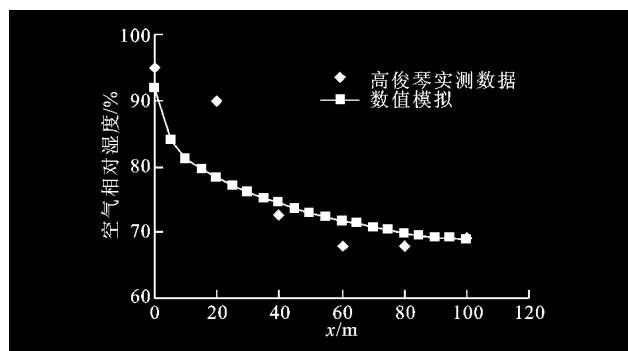


图6 0.2 m 高度处相对湿度的模拟结果与实测数据比较

4 结 论

(1) 对实测案例的模拟表明, 本文的数值模型和计算方法可以很好地模拟湿地对周边区域空气温度、湿度的影响, 数值预测湿地的降温增湿是可行的.

(2) 湿地对周边空间气温的影响, 与其对相对湿

度的影响并不完全一致,尤其在较远处,气温对地面的影响比水气更明显.

参考文献:

- [1] 高俊琴,吕宪国,刘红玉. 湿地冷湿效应初探[J]. 农村生态环境,2003,19(1):18-21.
Gao Junqin, Lü Xianguo, Liu Hongyu. Preliminary study of cooling and humidifying effects of wetlands [J]. Ecological Environment of Countryside, 2003, 19 (1):18-21.
- [2] 高俊琴,吕宪国,李兆富. 三江平原湿地冷湿效应研究[J]. 水土保持学报,2002,16(4):149-151.
Gao Junqin, Lü Xianguo, Li Zhaofu. Study of cooling and humidifying effects of Sanjiang Plain wetland[J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2002, 16(4): 149-151.
- [3] 张芸,吕宪国,倪健. 三江平原典型湿地冷湿效应的初步研究[J]. 生态环境,2004,13(1):37-39.
Zhang Yun, Lü Xianguo, Ni Jian. Preliminary study of cooling and humidifying effects of typical wetland in Sanjiang Plain[J]. Ecological Environment, 2004, 13 (1):37-39.
- [4] Robitu M, Musy M, Inard C, et al. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban micro-climate[J]. Solar Energy, 2006, 80:435-447.

(编辑 荆树蓉)