

李步飞,王冠宇,刘庆功,等. 土壤-空气换热系统热性能的模拟与分析[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):265-267,277.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.063

土壤-空气换热系统热性能的模拟与分析

李步飞^{1,2}, 王冠宇³, 刘庆功^{1,2}, 王国英^{1,2}, 赵子凡⁴

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西晋中 030600; 2. 山西省研究生教育创新中心, 山西晋中 030600;

3. 太原理工大学软件工程学院, 山西晋中 030600; 4. 东南大学经济管理学院, 江苏南京 211189)

摘要:针对土壤-空气换热器在日光温室中加热条件下土壤中热量传递的问题,研究利用 SIMPLER 算法,对土壤-空气换热系统的热性能进行数值模拟,并研究空气流速度对该系统热性能的影响,以获得最佳的进口空气速度。首先以土壤导热方程为基础,再结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型,将固体区与流体区作为 1 个整体全场求解,最后对空气与土壤的交界处用壁面函数法进行特别处理。在此基础上,通过建立土壤-空气换热器瞬态二维模型,模拟研究不同入口空气速度对土壤-空气换热器热性能的影响。模拟结果表明,当入口温度相同时,随着空气流动速度的加快,进出口空气温差逐渐减小。在此过程当中,系统换热量和 COP 的增加均越来越慢。通过模拟结果可知,空气的最佳入口流速为 6.5 m/s。研究结果对农业温室的运行和节能有参考价值。

关键词:土壤-空气换热器;数值模拟;耦合传热;节能

中图分类号: TK523; TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0265-03

当今世界对能源的需求日趋增加,但煤、石油、天然气等化石能源的过度使用,不仅引发了能源危机,还造成了严重的环境污染,对清洁可再生能源的研究迫在眉睫。太阳能是一种清洁的可再生能源,并且取之不尽,用之不竭。土壤是一种良好的蓄热体,土壤表层储存了大量的太阳辐射能,并且在土壤深度方向上随着太阳能的衰减,4 m 以下的土壤温度基本不变,等于全年的平均气温^[1]。

土壤-空气换热器利用储存在土壤里的能量,加热或冷却室外空气,改善建筑物的热环境,具有良好的节能效果和环保效益。在建筑节能和农业温室方面得到了广泛的应用^[2-3]。为了评价土壤-空气换热系统的热性能,国内外的学者提出了一些传热模型。Carslaw 等提出了一维分析解模型^[4];Santamouris 等提出了一维单管模型^[5]。

近年来随着计算机技术的发展,国内外的学者们开始使用 CFD 软件进行数值模拟,大部分的数值研究认为,管内空气的流动状态为层流或湍流。但是,他们假设空气与管之间的对流换热系数为常数^[6-7]或者近似为平均风速的函数^[8],这显然是不准确的。

一些学者则进行了试验研究。Mavroyanopoulos 等将 20 根铝管埋在温室下方 2 m 处,实测发现,冬天夜晚室外温度为 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温室内的平均温度则可以达到 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且风机的耗能仅为温室所获得能量的 20%^[9]。Ghosal 等将管埋在地下 1 m 处,通过与没有使用土壤-空气换热器的房间对比可以发现,使用土壤-空气换热器的房间夏天室内温度可以

低 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬天可以高 $6\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。

从上述文献可知,国内外的学者要么只研究土壤里的温度分布,忽略了空气流动^[4-5],要么认为空气与管之间的对流换热系数为常数^[6-7]或者近似为平均风速的函数^[8],但实际情况并非如此,对流换热系数不仅与平均流速有关,还与流动状态有关。试验虽然可以提供可靠的结果,但是投资和运行成本太高,限制了它的研究。

本研究考虑到土壤与空气的耦合传热特性,以土壤导热方程为基础,结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用全场求解的方法,利用 SIMPLER 算法^[11]对土壤-空气换热器系统的热性能进行瞬态数值模拟。

1 数学模型

由图 1 可知,管长 18 m,管径为 0.11 m,埋深 2 m,空气通过埋管与土壤进行热交换。为了简化理论分析,作以下基本假设:(1)土壤的物性参数为常数;(2)Slayer 的研究结果表明,湿迁移对传热的影响小于 0.1%^[12],忽略湿迁移对传热造成的影响;(3)不考虑空气在管内的相变;(4)塑料管很薄,管材对传热的影响忽略不计^[13-14],假设与土壤拥有相同的导热系数。

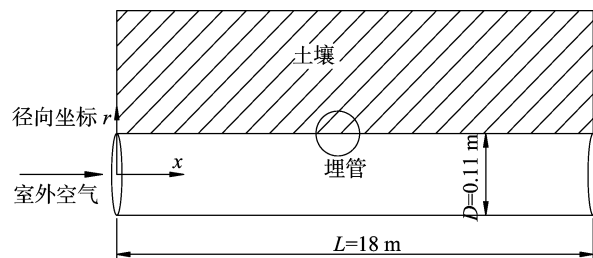


图1 土壤-空气换热系统图示

对于二维流动与换热问题,它的控制方程及离散方程分别为

收稿日期:2017-11-17

基金项目:山西省自然科学基金青年基金项目(编号:2015021119)。

作者简介:李步飞(1990—),男,山西晋中人,硕士,研究方向为土壤修复、环境污染控制、供水管网优化调度与管理。E-mail:1039776008@qq.com。

通信作者:王国英,博士,副教授,研究方向为土壤修复、环境污染控制、废水生物处理。E-mail:1156135367@qq.com。

质量方程: $\partial \rho / \partial \tau + \partial (\rho u) / \partial x + 1/r \times \partial (\rho v) / \partial r = 0$ 。(1)

动量方程: $\partial (\rho u) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \vec{u} u) = -\partial p / \partial x + \nabla \cdot (\Gamma \nabla u) + S_u$;

$\partial (\rho v) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \vec{u} v) = -\partial p / \partial x + \nabla \cdot (\Gamma \nabla v) + S_v$ 。(3)

$k-\varepsilon$ 湍流模型: $\partial (\rho k) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla k) + S_k$;

$\partial (\rho \varepsilon) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varepsilon) + S_\varepsilon$;

能量方程: $\partial (\rho^* T) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho^* \vec{u} T) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla T) + S_T$ 。(6)

离散方程: $A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + y$ 。(7)

式中: u 为轴向流速, m/s ; r 为径向流速, m/s ; T 为温度, $^\circ\text{C}$; k 为脉动动能, J ; ε 为脉动耗散率; ρ 为密度, kg/m^3 ; ρ^* 为 ρc_p 广义密度^[15], $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; Γ 为广义扩散系数; S 为源项; A_P 、 A_E 、 A_W 、 A_N 、 A_S 均为离散方程的系数; E 、 W 、 N 、 S 分别为与控制体节点 P 相邻的右、左、上、下节点; 对 u 、 v 、 k 、 ε 、 T 方程中的广义扩散系数 Γ 定义如下:

u 、 v 方程中: $\Gamma = \eta_{\text{eff}} = \eta + \eta_t$; k 方程中: $\Gamma = \eta + \eta_t / \sigma_k$; ε 方程中: $\Gamma = \eta + \eta_t / \sigma_\varepsilon$; T 方程中: $\Gamma = \lambda + c_p \cdot \eta_t / \sigma_t$ 。(8)
式中: η 为分子黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_t 为紊流黏性系数; η_{eff} 为有效黏性系数; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; σ_k 、 σ_ε 、 σ_t 均为经验常数;

对 u 、 v 、 k 、 ε 、 T 方程中的源项定义如下:

$S_u = \partial / \partial x (\eta_{\text{eff}} \partial u / \partial x) + 1/r \times (\partial / \partial r) (r \eta_{\text{eff}} \partial v / \partial x)$;

$S_v = \partial / \partial x (\eta_{\text{eff}} \partial u / \partial r) + 1/r \times (\partial / \partial r) (r \eta_{\text{eff}} \partial v / \partial r) - (2\eta_{\text{eff}}) / r^2 \times v$;

$S_k = \rho G_k - \rho \varepsilon$;

$S_\varepsilon = \varepsilon / k (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \varepsilon)$;

$T: S_T = 0$ 。

其中:

$G_k = \eta_t / \rho \{ 2 [(\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial r)^2 + (v/r)^2] + (\partial u / \partial r + \partial v / \partial x)^2 \}$ 。(10)

公式(8)和公式(9)中的常数: $c_1 = 1.44$ 、 $c_2 = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $\sigma_t = 0.9$ 。

1.2 方程离散处理

1.2.1 离散格式的选取 基于交错网格的 SIMPLER 算法, 非稳态项采用全隐格式; 对流项采用 QUICK 格式, 并用延迟修正法^[16]来求解 QUICK 格式所形成的代数方程; 扩散项采用中心差分格式; 源项采用局部线性化^[17]的方法进行处理; 采用方法 B^[17]对计算域进行离散, 得到 128×360 的均匀网格; 由于采用 SIMPLER 算法压力不用亚松弛, 但其他方程须要将亚松弛组织到代数方程中, 经过反复试算, 推荐的亚松弛因子如下: 动量方程取 0.6, 能量方程取 0.8~0.9, 湍流方程取 0.7。

1.2.2 边界条件的选取

1.2.2.1 换热管入口处 (1) 轴向速度 u 取进口风速, 径向速度 v 取 0, 进口温度取室外温度。(2) 进口脉动动能 k 取来流平均动能的 0.5%~1.5%^[18]。(3) 进口耗散率 ε 的选取, 首先由 $\rho \eta L / \eta_t = 100 \sim 1\,000$ ^[11], 确定紊流黏性系数 η_t , 再由 $\eta_t = (c_\mu \rho k^2) / \varepsilon$ 确定 ε , c_μ 为经验常数, 取 0.09。

1.2.2.2 换热管轴心处为对称边界条件 对称线处 u 、 k 、 ε 、

T 的法线导数为 0, 径向速度 v 取 0。

1.2.2.3 换热管出口处 出口边界的 u 、 v 、 k 、 ε 、 T 采用局部单向化方法来处理, 并且出口边界的法相速度 u 的分布满足总体质量守恒。

1.2.3 对固体区域及近壁面节点的处理 对流动中固体区及近固体壁面节点正确处理计算的关键, 固体区附近网格及节点划分如图 2 所示。本研究将固体看成是黏性无穷大的流体, 固体表面的边界条件采用壁面函数法来处理。

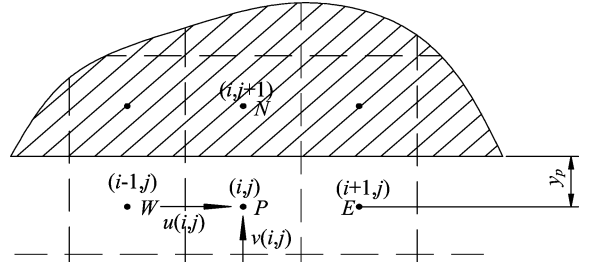


图2 位于流场中的土壤边界

图 2 中, P 点与壁面间的当量导热系数 $\lambda_t(i, j) = (y_p^+ \eta c_p) / (\sigma_t [\ln(E y_p^+) + P])$; P 点与壁面间的当量扩散系数 $\eta_t(i, j) = (y_p^+ \eta) / [\ln(E y_p^+) / K]$; P 点处与壁面垂直的速度 $v(i, j)$ 、脉动动能 $k(i, j)$ 、耗散率 $\varepsilon(i, j)$ 的法线导数 $\partial \phi / \partial y = 0$; P 点的耗散率 $\varepsilon(i, j)$ 用大源项法^[17]取给定值, $\varepsilon_p = [c_\mu^{(3/4)} k_p^{(2/3)}] / (K y_p)$ 。其中: y_p 为第 1 个内节点 P 到壁面的距离, m ; y_p^+ 为无量纲长度, $y_p^+ = [\rho y_p c_\mu^{(1/4)} k_p^{(1/2)}] / \eta$; K 为经验常数, $K \in [0.40, 0.42]$; E 为经验常数, $E \in [7.4, 10.0]$; P 为经验常数, $P = 9$ 。

2 模型的检验与验证

2.1 网格的独立性检验

本研究分别采用 32×90 、 64×180 、 128×360 、 192×540 、 256×720 等 5 套网格进行数值模拟, 得到的壁面平均努塞尔数与节点数的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 当节点数大于 128×360 以后, 再进一步细化网格, 在工程允许的偏差范围内数值解几乎不再发生变化。因此本研究采用 128×360 这套网格进行数值模拟。

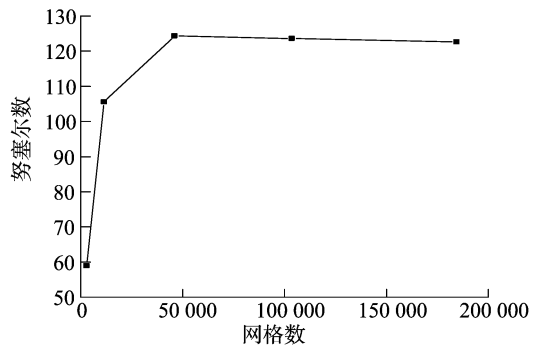


图3 对于不同网格数的壁面平均努塞尔数

2.2 模型的验证

为了验证该模型的合理性, 在山西省太原市小店区孙家寨益丰农业科技种植示范园内一栋新建的日光温室内搭建土壤-空气换热器试验平台。

试验于 2016 年 5 月进行, 对换热器管内不同点的空气温

度进行连续测试,每次数据采集间隔为2 min,通过 Enview 检测软件按选定的时间段导入 Microsoft Excel 中进行汇总分析,并把实测数据与模拟结果进行对比。由图4可知,二者吻合较好,入口空气温度的平均相对误差仅为7.7%,而均方误差仅为0.75℃。

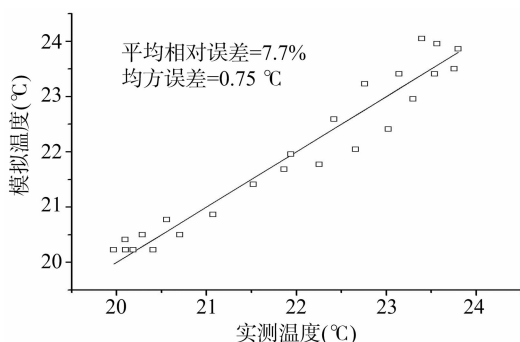


图4 换热器出口温度实测值与模拟结果的对比

3 模拟结果与讨论

在上述模型的基础上,分析不同进口风速对土壤-空气换热器系统热性能的影响;试验中风机所能达到的出口风速为2.5~9.5 m/s,所以此处进口风速取值范围为2.5~9.5 m/s。由图5可知,当空气被加热时,速度越小,出口温度越高,平均温升就越大;当空气被冷却时,速度越小,出口温度越高,平均温降就越大。但是平均温降、平均温升不是唯一评价土壤-空气换热器热性能的指标,还要考虑换热量、系统COP、处理的风量等。COP为土壤-空气换热器性能系数。 $COP = q/Q$ 。式中: q 为土壤-空气换热器单位时间的换热量, W ; Q 为风机的输入功率, W 。

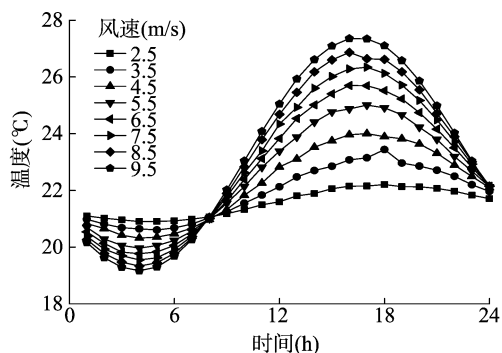


图5 不同风速下土壤-空气换热器的出口温度

由图6可知,速度越大整个系统的换热量越大。随着速度的增加,换热量的增加却十分缓慢。但是,速度的增加却大大增加了系统的耗能。由图7可知,虽然速度越大整个系统的换热量越大,但由于速度的增加导致风机的耗能增加,从而使系统的COP下降。当风速为6.5 m/s时,系统的COP最大,在此基础上增加风速虽然可以增加换热量,但增加的效果并不明显,反而会增加风机的耗能导致系统的COP下降。因此,模拟研究结果表明,该土壤-空气换热系统的最佳进口风速为6.5 m/s。

4 结论

本研究利用SIMPLER算法对土壤-空气换热器系统进

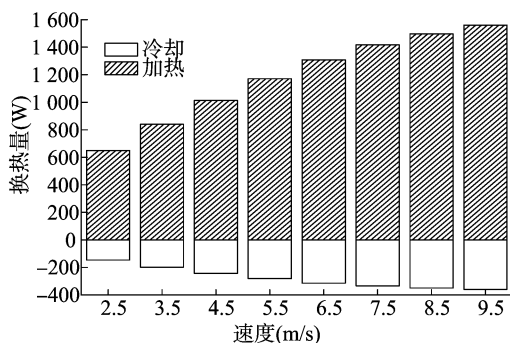


图6 不同风速下土壤-空气换热器的换热量

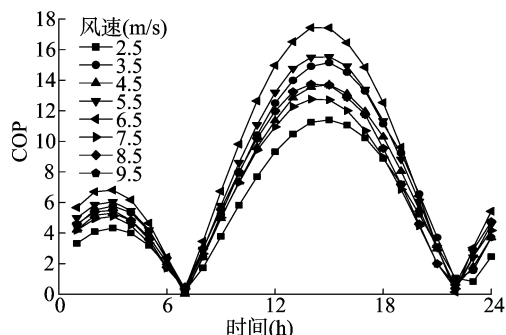


图7 不同风速下土壤-空气换热器的COP

行了数值模拟,分析了不同进口风速对系统热性能的影响,可得到如下结论:

- (1)以土壤为冷热源,使用土壤-空气换热器系统可以起到良好的降温效果。
- (2)通过分析土壤-空气换热系统的出口温度、换热量、系统COP等得出最佳的进口风速为6.5 m/s。
- (3)当入口空气温度相同时,风速越小,空气经过土壤-空气换热器的温度变化就越大。
- (4)风速越大,土壤-空气换热器的换热长度越长,需要更长距离达到热平衡,以后在试验中可以适当增加换热管长度。

参考文献:

- [1]Bharadwaj S S, Bansal N K. Temperature distribution inside ground for various surface conditions[J]. Building and Environment, 1981, 16(3): 183-192.
- [2]Antinucci M, Fleury B, Lopez D'Asiain J, et al. Passive and hybrid cooling of building - state of the art[J]. Int. J. Solar Energy, 1992, 11(3/4): 251-271.
- [3]Satnamouris M, Argiriou A, Vallindras M. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse[J]. Solar Energy, 1994, 52(5): 371-378.
- [4]Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [5]Santamouris M, Lefas C C. Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouses with subsurface heat storage[J]. Energy in Agriculture, 1986, 5(2): 161-173.
- [6]Benazza A, Blanco E, Aichouba M, et al. Numerical investigation of horizontal ground coupled heat exchanger[J]. Energy Procedia, 2011, 6(6): 29-35.

(下转第277页)

- detoxification[J]. Plant Physiology, 2000, 123(3): 825–832.
- [10] Jones D L, Hodge A, Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition[J]. New Phytologist, 2004, 163(3): 459–480.
- [11] Gupta D K, Rai U N, Sinha S, et al. Role of *Rhizobium* (CA-1) inoculation in increasing growth and metal accumulation in *Cicer arietinum* L. growing under fly-ash stress condition[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 73(2): 424–431.
- [12] Rajkumar M, Ma Y, Freitas H. Characterization of metal-resistant plant-growth promoting *Bacillus weihenstephanensis* isolated from serpentine soil in Portugal[J]. Journal of Basic Microbiology, 2008, 48(6): 500–508.
- [13] Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G A, et al. Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1/2): 35–44.
- [14] Compant S, Clément C, Sessitsch A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(5): 669–678.
- [15] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] Penrose D M, Glick B R. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Physiologia Plantarum, 2003, 118(1): 10–15.
- [17] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248–254.
- [18] Sheng X F, Xia J J, Jiang C Y, et al. Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1164–1170.
- [19] Sagervanshi A, Kumari P, Nagee A, et al. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from an agricultural soil[J]. International Journal of Life Science and Pharma Research, 2012, 2(3): 1256–1266.
- [20] Belimov A A, Hontzas N, Safronova V I, et al. Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(2): 241–250.
- [21] Zhang Y F, He L Y, Chen Z J, et al. Characterization of lead-resistant and ACC deaminase-producing endophytic bacteria and their potential in promoting lead accumulation of rape[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1720–1725.
- [22] Glick B R, Penrose D M, Li J P. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria[J]. Journal of Theoretical Biology, 1998, 190(1): 63–68.
- [23] Patten C L, Glick B R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(8): 3795–3801.
- [24] Glick B R. Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase[J]. FEMS Microbiology Letters, 2005, 251(1): 1–7.
- [25] Chaudri A M, Allain C, Barbosa-Jefferson V L, et al. A study of the impacts of Zn and Cu on two rhizobial species in soils of a long-term field experiment[J]. Plant and Soil, 2000, 221(2): 167–179.
- [26] Bharti N, Yadav D, Barnawal D, et al. *Exiguobacterium oxidotolerans*, a halotolerant plant growth promoting rhizobacteria, improves yield and content of secondary metabolites in *Bacopa monnieri* (L.) Pennell under primary and secondary salt stress[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 29(2): 379–387.
- [27] Dastager S G, Kumaran D C, Pandey A. Characterization of plant growth-promoting rhizobacterium *Exiguobacterium* N II-0906 for its growth promotion of cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. Biologia, 2010, 65(2): 197–203.
- [28] Selvakumar G, Joshi P, Nazim S, et al. *Exiguobacterium acetylicum* strain 1P (MTCC 8707) a novel bacterial antagonist from the North Western Indian Himalayas [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2009, 25(1): 131–137.
- (上接第 267 页)
- [7] Misra R, Bansal V, Agrawal G D, et al. CFD analysis based parametric study of derating factor for earth air tunnel heat exchanger[J]. Applied Energy, 2013, 103(1): 266–277.
- [8] Wu H J, Zhu D S, Li J, et al. Thermodynamic analysis of earth cooling system combined with adsorption dehumidifier for air condition[J]. Journal of South China University of Technology, 2003, 31(7): 37–41.
- [9] Mavroyanopoulos G N, Kyritsis S. The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 36(3): 263–268.
- [10] Ghosal M K, Tiwari G N, Srivastava N S L. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(3): 219–227.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 218–225.
- [12] Slayer R O. Plant-water relationships[M]. London and New York: Academic Press, 1971.
- [13] Bansal V, Misra R, Agrawal G D, et al. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(11): 1151–1154.
- [14] Badescu V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house[J]. Renewable Energy, 2007, 32(5): 845–855.
- [15] Li W, Yu B, Wang Y, et al. Study on general governing equations of computational heat transfer and fluid flow[J]. Communications in Computational Physics, 2012, 12(5): 1482–1494.
- [16] Hayase T, Humphery J A C, Greif R. A consistently formulated QUICK scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative[J]. Journal of Comput Phys, 1992, 98(1): 108–118.
- [17] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [18] Patankar S V, Sparrow E M, Ivanovic M. Thermal interactions among the confining walls of a turbulent recirculating flow[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1978, 21(3): 269–274.