

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

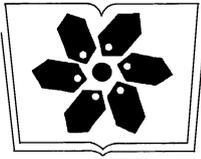
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 2012

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 6 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例.....	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价.....	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用.....	纪金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系.....	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究.....	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征.....	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学研究所.....	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析.....	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响.....	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择.....	赵宠南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象.....	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响.....	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响.....	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用.....	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.....	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析.....	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征.....	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N ₂ O 排放及其主要影响因素.....	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素.....	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图.....	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征.....	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响.....	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划.....	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现.....	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析.....	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定.....	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响.....	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究.....	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素.....	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究.....	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析.....	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述.....	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响.....	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)



封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201102170183

刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析. 生态学报, 2012, 32(6): 1951-1959.

Liu Y H, Guo J P, Wei Q S. Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1951-1959.

基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析

刘艳红, 郭晋平*, 魏清顺

(山西农业大学林学院, 太谷 030801)

摘要:运用 CFD 数值模拟方法, 结合 RS 技术, 对城市中五类常见的绿地空间格局在垂直和水平方向上进行温度场和风速场数值模拟, 以探讨绿地空间格局对城市热环境的影响程度及方式。在绿地的垂直结构上, 灌木层对流场的影响要大于乔木层; 而乔木层对绿地内部的降温作用更为明显。在绿地的水平布局形式中, 在绿地率相当的情况下, 楔状格局具有较好的热环境效应, 即该格局在城市中的降温效果最为明显; 放射状和条带状的次之, 点状格局对周边环境的降温效果要弱些, 但各“绿点”(即组成该格局的各块绿地)在小范围内降温效果比较明显, 可以作为改善局部小气候的手段; 环状格局热环境效应最弱。将 CFD 技术引入城市热环境研究, 利用遥感技术对其进行参数修正, 使热环境研究更加准确完整, 具有经济高效方便等优点。

关键词:绿地空间格局; 热环境效应; CFD; 遥感技术

Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics

LIU Yanhong, GUO Jinping*, WEI Qingshun

The Forestry College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract: The temperature and velocity fields of five common forms for urban green space patterns in the vertical and horizontal directions have been simulated by computational fluid dynamics (CFD) and remote sensing (RS), in order to study the influence and extent of green space patterns on an urban thermal environment. Based on Thematic Mapper remote sensing images (resolution 30 m) of Taiyuan (111°30' to 113°09'E, 37°27' to 38°25'N) acquired on September 16, 2008, numerical models of plant cover were used within a traditional CFD framework. A typical mathematical model of green space distribution patterns was established. CFD model parameters were modified to improve the accuracy of the simulation using RS technology related to the parameters and results. The results show that the shrub layer has a greater influence than the tree layer in the flow field for the vertical structure of a green space. In order to form good local circulation within the green space, importance is attached to the choice and configuration of the shrub layer. Nevertheless, the cooling effect for the tree layer is more apparent. For appropriate rates of change of green space, the following results can be obtained. A wedge-shaped pattern of green space had the most significant cooling effect in the city, followed by radial and banded patterns. The cooling effect of a green space point pattern was insignificant on the surrounding environment. However, local vorticity in its velocity field was obvious, showing that a green space point pattern had a significant cooling effect within a small area and therefore could be used to improve local microclimates. The cooling effect of a ring-shaped pattern was the weakest. We conclude that it is possible to use CFD numerical simulation technology in the study of urban thermal environments, and additionally, remote sensing technology can be used to modify the parameters

基金项目: 山西农业大学科技创新基金资助项目(2008010)

收稿日期: 2011-02-17; 修订日期: 2011-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinpguo@126.com

needed for CFD. CFD has the advantages of saving time, effort and monetary expense. Also, the complementary application of CFD and remote sensing to thermal environment studies will make the results more accurate and complete. Based on the study results, some corresponding proposals for urban green space planning and construction are posed.

Key Words: green space pattern; thermal environment effect; computational fluid dynamics; remote sensing technology

20 世纪以来,城市化进程中密集的人类活动对城市景观格局的改造已经导致了诸多生态环境问题,其中城市热环境问题尤为突出^[1]。城市绿地在改善城市热环境的过程中起到非常重要的作用,然而城市中用地紧张的现状不能满足单一的绿地面积扩增,因此在有限增加绿地面积的同时,合理优化城市绿地景观格局,提高绿地系统的生态效应就成了改善城市热环境问题的重要思路。另外,风对于城市环境的变化也起着重要作用,只有风将绿地内的低温高湿的清洁空气携带到周围区域时,绿地才能发挥其对周边环境的生态效应。同理,城市热环境的好坏与城市风环境息息相关。

在传统的绿地建设中,缺少对利用绿地改善城市热环境的明确指导,对于城市绿地在改善城市热环境中的作用也只停留在感性的认识层面,而对于城市绿地的生态效应更无宏观层面上的量化的评价标准^[2],由此也引发了绿地建设中“重美化,轻生态”等问题。为了在最大限度上发挥城市绿地对热环境的改善缓解作用,本文借助计算流体力学(CFD)的数值模拟方法,对几类典型绿地分布格局在不同高度上的温度场(即绿地内部的自身热量交流)和风速场(即绿地与外部环境的热量交换)进行模拟,以此来探寻绿地内部自身的垂直结构对形成局部环流的影响,另一方面,通过比较不同格局的温度场和风速场的分布情况来探讨绿地的水平分布格局对城市热环境的影响。

使用 CFD 模拟评价城市热环境已较为普遍,如清华大学林波荣^[3]等人采用 CFD 模拟居住区建筑周围空气流动情况。但以往的城市热环境模拟大多是对某一典型区域进行数字建模,并模拟出该区域的温度、湿度、风速等参数,并与实测数据比较,用以定量描述热环境的特征以及预测其发展态势^[4-5]。本文在传统的框架中引入植物模型,进而建立典型绿地分布格局的数学模型,并利用 RS 技术的相关参量和结果对 CFD 模型的相关参数设置进行修正,以进一步提高模拟结果的准确性。

1 研究方法

计算流体力学(CFD)技术,是以电子计算机为工具,应用各种离散化的数学方法,对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究,以解决各种实际问题。其基本原理是数值求解控制流体流动的微分方程,得出流体流动的流场在连续区域上的离散分布,从而近似模拟流体流动情况。

在城市热环境的研究中,通过建立一定区域的三维数学模型,运用 CFD 技术对其中的气流组织进行数值计算,根据提供的合理边界条件和参数设置,可以对区域空气流动形成的温度场、速度场结果进行直观显示,并根据模拟结果对其可行性和合理性进行分析研究,不断优化设计方案。但是,CFD 技术在城市尺度的研究上存在着参数不好设置、验证较为困难等问题,本研究利用遥感技术的相关参量和结果对 CFD 模型的参数设置进行修正。

1.1 理论基础

大气在自然界中的流动大多是紊流,紊流脉动动能由切应力产生的紊流脉动动能和树冠尾流紊流特性的能量两部分组成。可压紊流平均流动的控制方程如下(为方便起见,除脉动值的时均值外,下式中去掉了表示时均值的上划线“—”,如 $\bar{\varphi}$ 用 φ 来表示):

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) &= \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) &= \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) &= \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_w \end{aligned} \quad (2)$$

其它变量运输方程

$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' \varphi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' \varphi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w' \varphi'})}{\partial z} \right] + S \quad (3)$$

式中, ρ 为空气的密度; t 为时间; U 是速度矢量; u, v, w 为 U 在 x, y, z 方向上的分量; p 为大气微元体上的压力; S_u, S_v 和 S_w 是微元体上的体积力; φ' 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

标准 $k-\varepsilon$ 模型^[6]为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j k - (\mu + \frac{\mu_t}{\delta_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] = \rho (P_k - \varepsilon) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j \varepsilon - (\mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] = \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \quad (6)$$

$$P_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中, μ_t 为涡粘性系数; P_k 为湍动能生成项; $C_\mu = 0.09$; $\delta_k = 1.0$; $\delta_\varepsilon = 1.3$; $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$ 。

1.2 植物三维模型构建

自然界的植物一般由树冠和树干组成,而植物对流场的影响在于冠层可以减小风速,增大湍流效果。然而植物是多种多样的,为了计算简单,必须对其进行简化:研究中把植物当成多孔介质处理,将树冠部分考虑为一体,即将树枝近似为树叶;将树干近似为密度非常稀疏的树冠。不同的树冠形状对流场的影响也有所不同,李亮等^[7]针对风洞试验,对树冠模型做了逐步简化,认为采用长方体模型通过适当的参数调整,就能够得到比较准确的模拟结果,而且具有建模简便、计算快捷、收敛性好等优点。因此,本研究植物就采用长方体模型,将乔木描述为:树干高 3 m、直径为 0.3 m 的圆柱体,树冠高 4 m、长宽各 3 m 的长方体;灌木描述为高 1 m,长 2 m,宽 1 m 的长方体;草本地被的高度近似为 0。

1.3 参数选择及修正

建立起数学模型以后,需要设置相应的参数才可以进行计算,为了使模拟结果更加准确,合理设置参数非常重要。

传统的 CFD 模型参数设置是大多以实测数据和已收集到的基础资料为依据,虽然大致可以反映模拟区域的实际情况,但是不准确,尤其是在城市大尺度的研究中,人工实测数据的同步性和空间代表性较差,为模型参数的合理设置增加了诸多的困难。因此,结合遥感技术对 CFD 模拟的参数设置的各个环节进行修改和调节是非常必要的。

结合太原市内绿地分布状况,根据 2008 年 9 月 16 日的 TM 遥感影像(分辨率 30 m),选取 500 m×1000 m 典型绿地样区,建立其绿地的植物数学模型,并以包含其绿地空间的长方体区域作为计算域,在建模完成后,采用四面体网格对其进行划分,进而根据设置的参数和边界条件进行数值计算;温度的测试采取 200 m×200 m 网格布点,在格网交点距地面 2 m 处测定其温度,共 20 组有效数据。将计算结果与相应实测点的温度比较,根据差异修正参数,直到两者有较好的吻合。

本研究在计算范围入口,其边界条件设定为速度入口,以当地季风风速 5 m/s 进行设定,而下游出口部设定为压力出口,地面的边界条件设定为墙面,其余部分的边界条件则采以对称设定,具体参数见表 1^[8]。将计算结果与实测点温度相比较,如图 1 所示,可以看出 CFD 模拟值与实测值具有一定的偏差,两者的吻合性较差,需要进一步修正其参数。

表 1 CFD 模拟参数值

Table 1 Simulation parameter values of CFD

	名称 Name	参数值 Parameter values
边界条件	进口 Inlet	$V=5 \text{ m/s}$
Boundary conditions	出口 Outlet	pressure outlet
	地面 Ground	Wall
	其余 Remainder	symmetry
	求解器 Solver	分离隐式 Segregated implicit formulation
$k-\varepsilon$ 湍流模型	k	0.05
Turbulence model	ε	0.19
差分格式	压力项 Pressure term	标准格式 Standard format
Difference Schemes	动量方程 Momentum equation	二阶迎风 Second-order Up-wind
	输运方程 Transport equation	二阶迎风 Second-order Up-wind
压力和速度的耦合 The coupling of pressure and velocity		SIMPLEC 算法 SIMPLEC algorithm
松弛因子	压力项 Pressure term	0.3
Relaxation factor	速度项 Velocity term	0.7

1.3.1 进口速度修正

自然风的风速在大气边界层中情况较为复杂,通常是随着距离地面高度的增加而增大,形成具有一定规律的风轮廓线。因此在垂直方向上保持风速不变不合理,需要随着高度的增加设置不同的风速值^[9]。CFD 进口边界设置中,取多个三维空间坐标点 (X_i, Y_i, Z_i) ($i=1, 2, 3, \dots$),并按照不同高度时风速值的变化情况逐一设置这些点,计算机将按照所提取点的速度值和空间位置插值计算其他点位的的风速值,因此预先设置的点对越多越好。

1.3.2 地表参数修正

自然地表的热红外比辐射率 ε 和归一化植被指数 (NDVI) 之间存在正相关关系,根据 Vande Griend 等^[10]人提出的经验公式(8)来求算地表比辐射率;地表粗糙度长度是反映下垫面粗糙状况的一个特征长度,体现各种下垫面对地表附近风环境运动起到干扰的范围,从求取的遥感灰度图上按地表的实际物质结构进行选点求其平均值,据此可以提取出不同区域的对应地表粗糙度长度值。

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(\text{NDVI}) \quad (8)$$

1.3.3 绿地热辐射修正

按照原有的设置方法,绿地作为城市体块,与建筑体块相比,仅是具有较低的温度,并不能很好地反映蒸腾作用对热环境的改善效果,也不能很好的显示绿地对周边风环境的影响,因此,需要近似模拟这种下垫面较低的温度和所引起的较弱的空气运动。由于 CFD 软件中还没有提供针对植被的参数设置,采用 CFD 模型中的 opening 数字体块作为代表植被的媒介,将城市中较大面积的绿地专门进行设置。引入遥感参数,首先从

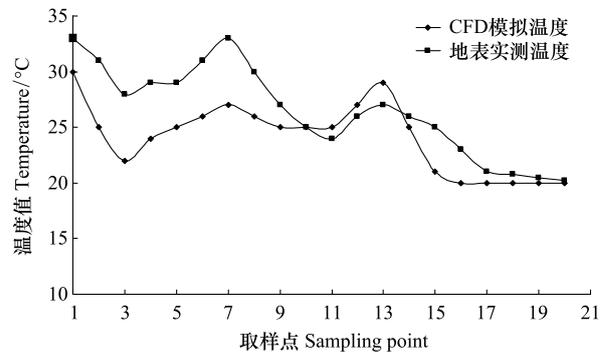


图 1 传统设置下的 CFD 模拟温度与实测温度对比

Fig. 1 The chart of actual surface temperature and CFD simulation temperature based on traditional settings

地表温度图上获得所模拟植被的地表温度状况,作为 opening 的表面设置温度,然后从地表蒸散图中抽取相应的绿地蒸腾量对表示绿地的 opening 进行设置并近似模拟微弱的空气运动以体现这些下垫面在空气流动中的作用。

根据修正参数后的模拟温度与地表实测温度进行对比,如图 2 所示,可以看出两者的热场结构、热环境关系具有一致性,模拟值更符合热环境的结构和运行状态,此时可以认为 CFD 模拟结果较为合理,由此可以该状态下的参数设置进行城市绿地的热环境模拟分析。

2 城市绿地空间格局热环境效应数值分析

城市绿地生态系统功能与绿地系统结构之间具有紧密而复杂的关系。有研究表明,当绿地覆盖率小于 40% 时,绿地系统的内部结构和空间布局状况对于绿地系统总体生态效应的发挥更为重要^[11]。绿地结构包括:(1)组成结构——植物组成;(2)层次结构——垂直方向上的层次;(3)配置结构——绿地的栽植密度和数量。绿地结构在小尺度上最能体现绿地生态功能的强弱,绿地结构越复杂,层次越丰富,则绿地的生态功能也越强^[12-13]。而绿地自身的层次结构即垂直方向上的结构层次对绿地内部形成局部环流,实现热量交换的影响尤为明显。另一方面,在绿地面积一定的情况下,绿地的布局形式成为在中小尺度上影响绿地生态功能发挥的重要指标。绿地的空间布局形式分为块状、网状、带状、环状、放射状、放射环状、指状、楔状等。我国城市绿地布局形式可归纳为点状、带状、环状、放射状、楔状及混合型(图 3)^[14]。

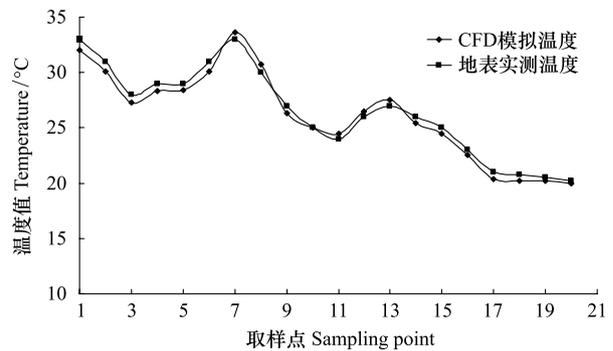


图 2 修正后的 CFD 模拟温度与实测温度对比
Fig. 2 The chart of actual surface temperature and CFD simulation temperature based on changing parameters

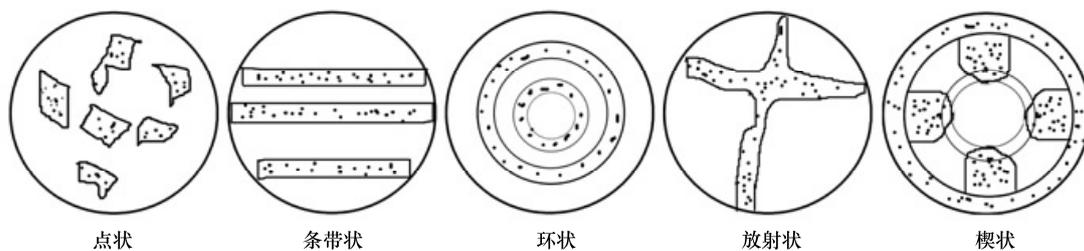


图 3 城市绿地布局基本形式部分示意图^[14]
Fig. 3 The basic forms of distribution of urban green space

根据绿地空间结构和分布格局,结合前文中的植物模型,运用 AutoCAD 软件选择在 500×1000 m 的区域内,建立以上 5 种常见的典型绿地分布格局的理想数学模型。为了对不同格局的降温效应做比较,建模时把绿地面积定义为计算面积的三分之一,即绿地率定义为 33%,乔木和灌木按 1:1 的比例进行配置。模型建立后,采用 Gambit 软件来对模型进行网格划分,为下一步的 CFD 计算做准备。CFD 计算所进行的参数选择,则通过参数修正的方法逐一加以设置。经过迭代计算,分别输出距地面为 2m 和 5m 高度水平面上的温度场及风速场模拟(等值线)分布图。

2.1 绿地空间不同高度(垂直方向)上的风速场与温度场分布

在 2 m 高度上,绿地的垂直结构主要是灌木层,灌木层是组成城市绿地不可或缺的部分,对绿地的蒸散、通风状况都有着重要的影响;另外这也是人体对热环境感受最为明显的高度。在 5 m 高度上,绿地的垂直结构主要是乔木层,乔木层是构成城市绿地的主要部分,对绿地生态效应的发挥起到关键的作用。

从图 4 点状格局不同高度上的温度场和风速场分布情况可以看出:总体上,5 m 高度的乔木层较 2 m 高度的灌木层来说,温度较高、风速较大。具体来看:在风速场模拟分布图中,5 m 高度的乔木层上,各“绿点”

(即组成该格局的各块绿地)的间隙中速度漩涡比较明显,而且风速也较 2 m 的灌木层明显偏大;在绿地的下风向,乔木层的风速要明显大于灌木层。就各“绿点”内部来说,在 5 m 高的乔木层上有明显的速度变化,而 2 m 的灌木层,绿地内部的速度变化很小。这些分布特点都反应出灌木层对风速的阻挡作用要强于乔木层,对于需要形成良好的局部环流的绿地来说,灌木层的选择与配置应该加以重视。在不同高度温度场的分布图中:乔木层的温度普遍高于灌木层,这一特点在绿地的内部尤为明显,这主要是冠大荫浓的乔木层由其蒸散作用和遮阴效果为林下创造出一片凉爽的空间;而在绿地的间隙和下风向两个高度上的温度差异相对小一些。

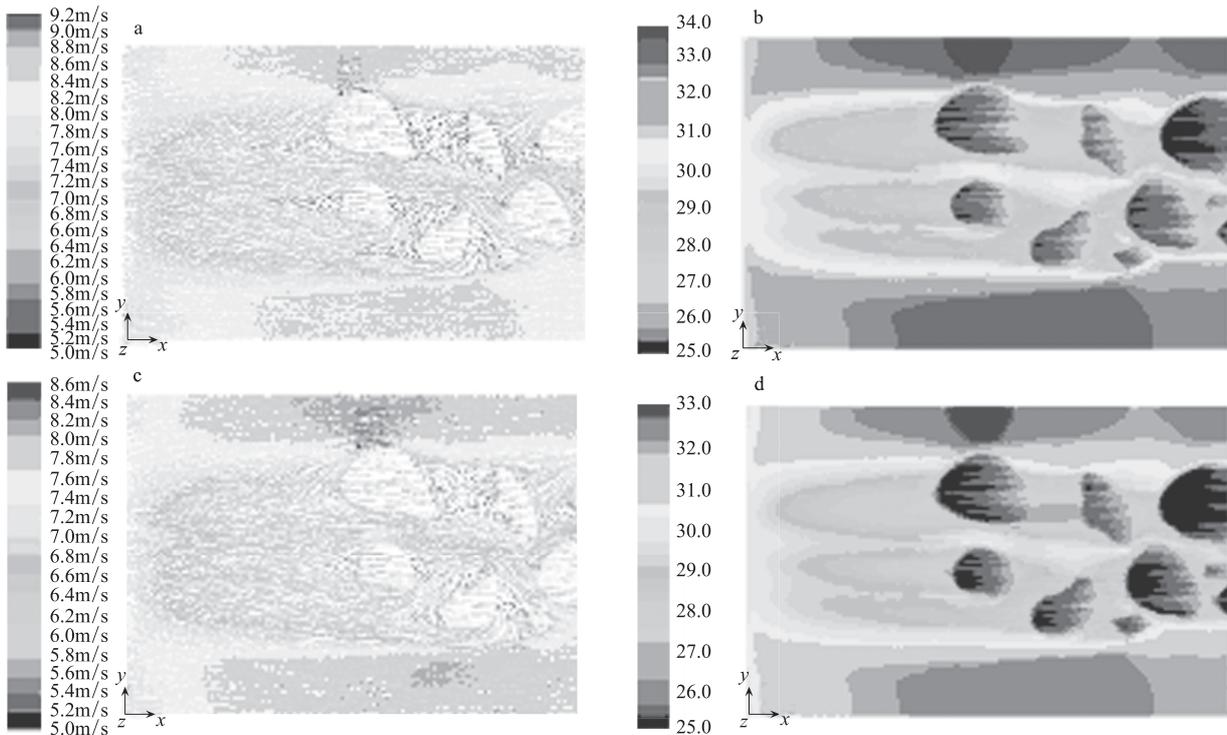


图4 点状格局不同高度上风速场和温度场模拟图

Fig. 4 Velocity field and temperature field for point-shaped pattern on different altitude

a: 风速场(5m 高度); b: 温度场(5m 高度); c: 风速场(2m 高度); d: 温度场(2m 高度)

在其他的常见绿地格局中,乔木层与灌木层的风速场和温度场的分布也有类似于点状格局的分布特点,如图 5 所反映的就是楔状格局中不同高度上的风速场和温度场的分布情况。限于篇幅关系,不再对其他绿地格局垂直结构上风速场和温度场的分布特点做详细分析。

比较绿地垂直结构上乔木层(5 m 高度)和灌木层(2 m 高度)的风速场和温度场的分布特点可以发现:灌木对风速的减弱作用大于乔木对其的影响,为了在绿地内形成良好的局部环流,加强其热量交换和空气流通,不宜在上风向布置较多的灌木;乔木虽然也会对绿地内部的风速有阻挡作用,但由于乔木的遮阳作用与蒸腾作用,在夏季可以有效地提高游人的舒适度^[15]。

2.2 绿地空间布局形式(水平方向上)的热环境效应数值分析

选择 2 m 高度上的温度场和风速场来分析,这一高度多为绿地内对形成局部环流影响比较大的灌木层,同时也是人对环境的舒适度感受最明显的高度。

2.2.1 不同布局形式内的温度场分析

在设定边界温度相等的情况下,经过内部的热量交换后,温度较低并趋于平均的区域,说明其内部热交换充分,绿地格局自身的通透性较好,反之亦然;而温差较大的区域,则反映出区域内热交换弱,绿地对其周边环境的影响力较弱。

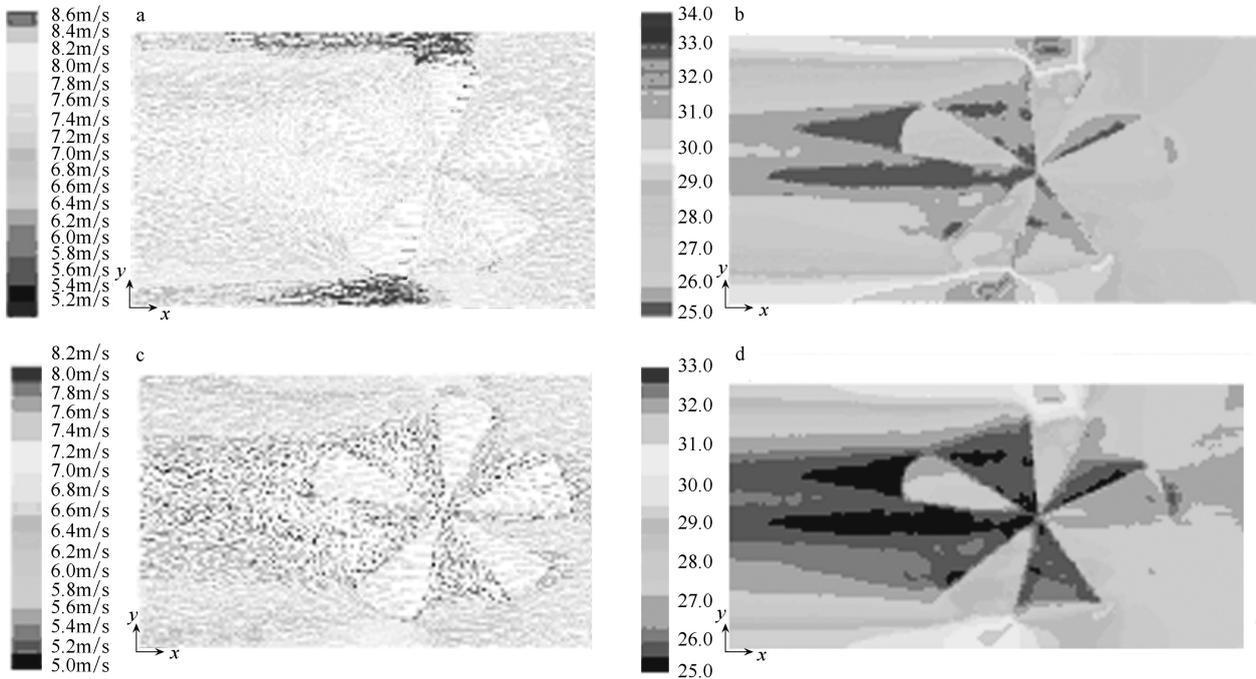


图5 楔状格局不同高度上风速场和温度场模拟图

Fig.5 Velocity field and temperature field for wedge-shaped pattern on different altitude

a:风速场(5m 高度);b:温度场(5m 高度);c:风速场(2m 高度);d:温度场(2m 高度)

从图6可以看出:点状格局中,低温值主要集中在绿地密集的区域(即植被覆盖率较高),距离各“绿点”越远,温度级别越高,而且在相邻“绿点”中间区域,温度的等值线分布比较密集,这说明该区域温度变化比较大,即点状格局在局部的降温效果比较明显。条带状格局内,整个区域的温度值较低,温度最低值往往出现在两条“绿带”之间,这与景观生态学中的廊道效应理论相吻合。而在环状格局中,总体温度值偏高,低温区主要集中在“绿环”之间,这也反映出环状格局封闭性较好,难以与周边环境形成热交换。放射状格局和楔状格局中,模拟区域的总体温度值较低,在绿地的下风向和绿地边缘这种趋势更加明显,因此,可以认为,放射状和楔状在绿地的水平分布格局具有较好的热环境效应,即在城市绿地规划中,可以作为缓解热岛问题有效手段之一。

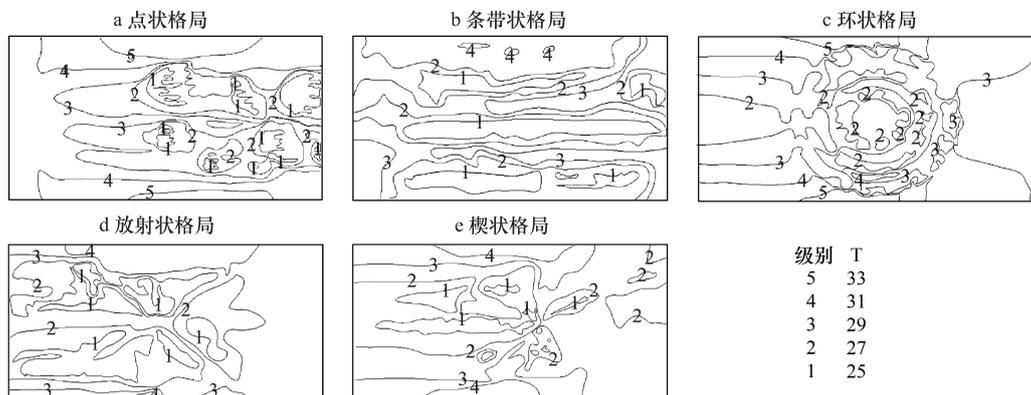


图6 温度场等值线图

Fig.6 Isoline map of temperature field

2.2.2 不同布局形式内的风速场分析

在设定的进口风速相等的情况下,下风出口方向风速越大,绿地与外界的热交换越强,如果其内部均温较

低,则对周边环境的降温效果越明显;速度漩涡越明显,则反映出相应区域的风速较大,局部热交换强烈,一般情况下,速度漩涡对应的是模拟区域内的低温区。从各类绿地分布格局的风速场模拟图(图7)可以看出,出口风速有以下的规律:楔状格局>放射状格局>条带状格局>点状格局>环状格局,其中点状格局中风速场内局部漩涡最为明显,可以形成良好的局部环流。

结合前面的模拟结果,可以认为:在绿地的垂直结构上,灌木层对流场的影响要大于乔木层;而乔木层对绿地内部的降温作用更为明显。在绿地的水平分布格局中,楔状格局因其自身内部热交换充分,总体温度较低,出口方向风速较大,与外界可以形成很好的交流,具有较好的热环境效应(即该格局在城市中的降温效果最为明显);放射状和条带状的次之,但条带状格局要发挥较好的热环境效应,必须是绿带排列方向与盛行风向平行;点状格局对周边环境的降温效果要弱些,但其内部可以形成良好的局部环流,因此,各“绿点”在小范围内的降温效果还是比较明显的,可以作为改善局部小气候的手段;环状格局降温效果最弱,内部均温较高,出口风速较小,与外界的热交换既不充分也不能带来明显的降温效果,但如果防风林等防护类绿地用此类分布格局,则能减少绿地内外的能量交换,可以起到预期的效果。

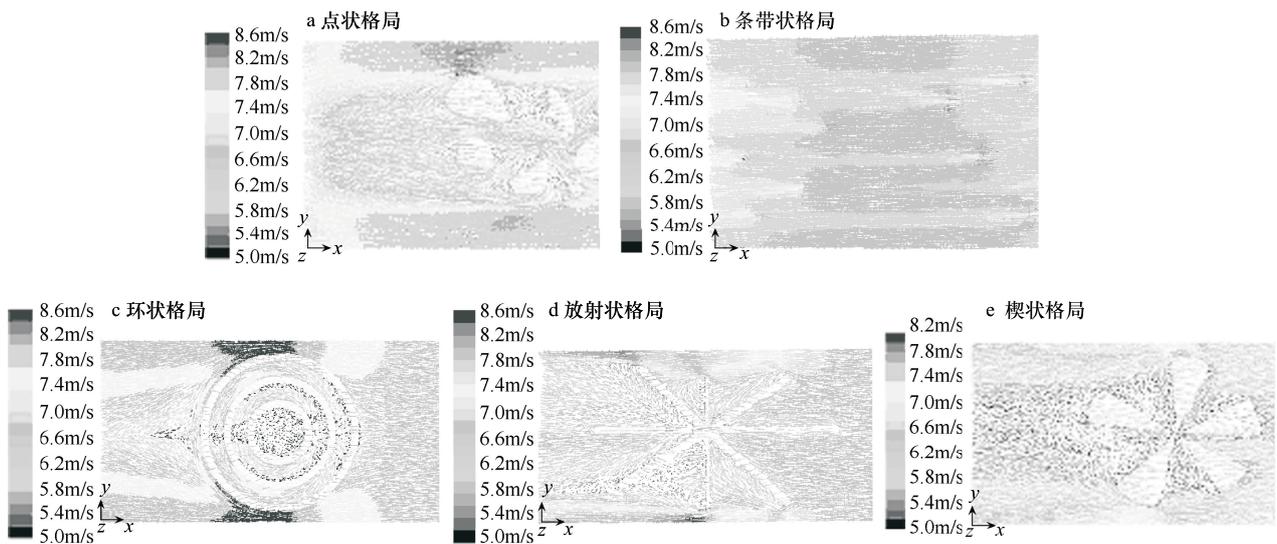


图7 风速场模拟图

Fig. 7 Simulation diagram of velocity field

因此,就改善城市热环境而言,城市绿地建设在增加绿地面积提高绿地率的同时,更应注重绿地自身的空间分布格局,完善其自身结构、优化其空间布局^[16],根据不同的绿地类型、功能,选择适宜的结构和合理的布局形式,使有限的绿地发挥最大的生态效应^[17-18]。

3 讨论

本文根据五种典型的常见绿地空间格局,建立了理想的模型进行分析,而在实际的绿地规划建设中,绿地垂直结构上是多层次组合,水平布局形式灵活多样,模拟结果可以在丰富复杂的绿地建设中,在结构选择、布局规划中提供一些参考。

城市热环境的形成与变化还受到其他多方面因素的影响。在本文的模拟中,将其他因素对各种格局的影响都假设为是相等的,而在实际工作中,其他因素对城市热环境的影响作用因具体环境而各不一样,必须加以重视,在特定环境中,某些因素的作用甚至会高于绿地。

在景观尺度上的城市热环境研究中,将 CFD 技术引入,并结合遥感影像对其进行参数修正,克服了传统研究中以实测数据为依据,同步性和空间代表性较差的缺点,这一思路是景观尺度研究城市绿地系统的新方向。运用 CFD 和 RS 技术相结合,相互补充,相互完善,进行城市绿地景观格局的数值模拟分析,使热环境研究更加准确完整,有助于将实际中需要经过建设以后才能得到检验的效果通过计算机的模拟加以实现,具有

经济高效方便等优点。

References:

- [1] Peng S L, Zhou K, Ye Y H, Su J. Research progress in urban heat island. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 574-579.
- [2] Zhang Y H, Huang R J, Chen B. Review on ecological benefits evaluation of urban green space. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Sciences Edition*, 2010, 9(4): 268-271.
- [3] Lin B R. *Studies of Greening's Effects on Outdoor Thermal Environment* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [4] Dhakal S, Hanaki K. Improvement of urban thermal environment by managing heat discharge sources and surface modification in Tokyo. *Energy and Buildings*, 2002, 34(1): 13-23.
- [5] Takahashi K, Yoshida H, Tanaka Y, Aotake N, Wang F L. Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energy and Buildings*, 2004, 36(8): 771-779.
- [6] Zhang Z K, Zhu Z Q, Zhuang F G. Multiblock grid generation technique for multicomponent combination and its application. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1998, 16(3): 312-317.
- [7] Li L, Li X F, Lin B R, Zhu Y X. Simulation of canopy flows using k- ϵ two-equation turbulence model with source/sink terms. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 146(6): 753-756.
- [8] Li K. *City Heat Environment Research Based on Remote Sensing and CFD Simulation* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [9] Liu H Z, Jiang Y J, Liang B, Zhu F R, Zhang B Y, Sang J G. Study of wind environment of urban tall buildings. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 35(S1): 84-96.
- [10] van de Griend A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1119-1131.
- [11] Wu Y X, Wang H Y. Factors affecting ecological benefit of urban greenland. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(2): 99-101.
- [12] Liu X Q, Tang W P, Shi P G, Hu X Y, Zheng L Y, Lan Y J. Study of ecological effects of different types for urban forest in Yichang. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2001, 116(2): 1-5.
- [13] Zhang H, Wang X R. Three-dimensional ecological characters of urban green space and its ecological function. *China Environmental Science*, 2001, 21(2): 101-104.
- [14] Tongji University, Chongqing Architectural Engineering Institute, Wuhan Urban Construction Institute. *Urban Green Space Planning*. Beijing: China Building Industry Press, 1982: 31-34.
- [15] Gao K, Qin J, Hu Y H. Study on mitigation of urban heat island by greening at residential areas in Shanghai. *Chinese Landscape Architecture*, 2010, 26(12): 12-15.
- [16] Feng X H. Study of the environmental effects of urban green space and wind. *Chinese Landscape Architecture*, 2010, 26(2): 82-85.
- [17] Wang S Z, Li M. Study on the principle of urban open space ecological planning (1). *Chinese Landscape Architecture*, 2001, 17(4): 5-9.
- [18] Wang S Z, Li M. Study on the principle of urban open space ecological planning. *Chinese Landscape Architecture*, 2001, 17(5): 32-36.

参考文献:

- [1] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 栗娟. 城市热岛效应研究进展. *生态环境*, 2005, 14(4): 574-579.
- [2] 张岳恒, 黄瑞建, 陈波. 城市绿地生态效益评价研究综述. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 9(4): 268-271.
- [3] 林波荣. 绿化对室外热环境影响的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [6] 张正科, 朱自强, 庄逢甘. 多部件组合体分块网格生成技术及应用. *空气动力学学报*, 1998, 16(3): 312-317.
- [7] 李亮, 李晓峰, 林波荣, 朱颖心. 用带源项 k- ϵ 两方程湍流模型模拟树冠流. *清华大学学: 自然科学版*, 2006, 146(6): 753-756.
- [8] 李鹏. 基于遥感与 CFD 仿真的城市热环境研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [9] 刘辉志, 姜瑜君, 梁彬, 朱凤荣, 张伯寅, 桑建国. 城市高大建筑群周围风环境研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(S1): 84-96.
- [11] 吴云霄, 王海洋. 城市绿地生态效益的影响因素. *林业调查规划*, 2006, 31(2): 99-101.
- [12] 刘学全, 唐万鹏, 石鹏皋, 胡兴宜, 郑兰英, 兰亚军. 宜昌市不同城市森林类型生态效益研究. *湖北林业科技*, 2001, 116(2): 1-5.
- [13] 张浩, 王祥荣. 城市绿地的三维生态特征及其生态功能. *中国环境科学*, 2001, 21(2): 101-104.
- [14] 同济大学, 重庆建筑工程学院, 武汉城建学院. *城市园林绿地规划*. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 31-34.
- [15] 高凯, 秦俊, 胡永红. 上海城市居住区绿化缓解热岛效应研究进展. *中国园林*, 2010, 26(12): 12-15.
- [16] 冯娴慧. 城市绿地与风的环境效应研究. *中国园林*, 2010, 26(2): 82-85.
- [17] 王绍增, 李敏. 城市开敞空间规划的生态机理研究 (上). *中国园林*, 2001, 17(4): 5-9.
- [18] 王绍增, 李敏. 城市开敞空间规划的生态机理研究 (下). *中国园林*, 2001, 17(5): 32-36.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
- Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
- Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
- The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao YANG Jimpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
- Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
- Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
- Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
- Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of *Amphidinium carterae* JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
- Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in *Strongylocentrotus intermedius* QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
- Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
- Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system YANG Li, LI Weide (1773)
- Effects of insect-resistant transgenic *Bt* rice with a fused *Cry1Ab+Cry1Ac* gene on population dynamics of the stem borers, *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*, occurring in paddyfield LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
- Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Frankliniella Occidentalis* (Pergande) FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
- The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV) WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
- The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
- Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
- Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
- N₂O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
- Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
- Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
- Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
- Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO₃-N migration in wheat WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
- Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
- Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
- Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
- Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
- Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of *Chrysanthemum grandiflorum* and its closely related genera SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
- Effect of the parasitic *Cuscuta australis* on the community diversity and the growth of *Alternanthera philoxeroides* WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
- Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
- Fine root longevity and controlling factors in subtropical *Alingia grilipes* and *Castanopsis carlesii* forests HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
- Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
- Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
- Review and Monograph**
- Review of the ecological compensation efficiency ZHAO Xueyan (1960)
- Scientific Note**
- The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元