

阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试*

孙悦超¹ 陈智² 赵永来³ 苏洁³ 潘坤³ 冬梅⁴

(1. 内蒙古机电职业技术学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;
3. 内蒙古农业大学职业技术学院, 包头 014109; 4. 内蒙古农业大学能源与交通学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 利用移动式风蚀风洞及相关配套设备对3种不同植被盖度的草地选择3种风速进行野外原位测试, 获得了不同植被盖度草地的风速廓线和输沙量。结果表明, 草地风速廓线总体上呈指数规律, 且随地表高度的增加迅速增大; 不同植被盖度草地在0~70 cm范围内输沙量与高度的关系以指数函数拟合效果好, 输沙量主要集中在近地表30 cm以下; 植被盖度55%的草地对在地表10 cm及以下的近地表风速阻挡效果与植被盖度80%的草地类似, 其输沙量曲线与植被盖度80%的草地输沙量曲线很近, 但距盖度30%的退化草地输沙量曲线较远。因此, 植被盖度约50%是阴山北麓草地有效防风蚀的最低盖度。

关键词: 草地 土壤风蚀 风速廓线 输沙量

中图分类号: S151^{+.1}; S155.4⁺⁷ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0143-05

Test of Grassland Soil Erosion of Farming-pastoral Zone in Northern Foot of Yinshan Mountains

Sun Yuechao¹ Chen Zhi² Zhao Yonglai³ Su Jie³ Pan Kun³ Dong Mei⁴

(1. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Huhhot 010070, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

3. College of Vocational and Technical, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China

4. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: The situ test in a grass field was conducted in three kinds of vegetation cover grass at three wind speeds, then the velocity profile and sediment discharge were obtained for different vegetation coverage of grassland by using mobile wind erosion wind tunnel device. The results showed that grass wind profile was exponent in generally and increased rapidly with the increase of height of surface elevation. There was a good fitting results for sediment discharge and height by using exponential function in the height of 0~70 cm for different vegetation coverage grasses, and the sediment discharge was mainly concentrated under the height of 30 cm of surface elevation. The barrier effect of near-surface wind speed was similar between 55% and 80% vegetation coverage of grassland under the height of 10 cm. The sediment discharge curve was very close between 55% and 80% grassland vegetation coverage, but the former was far from the sediment discharge curve of degraded grassland in 30% grassland vegetation coverage. Therefore, the minimum vegetation coverage was about 50% for preventing wind erosion effectively in the northern of Yinshan mountain.

Key words: Grassland Soil wind erosion Velocity profile Sediment discharge

收稿日期: 2012-01-12 修回日期: 2012-06-03

* 国家自然科学基金资助项目(41161045)和内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2010BS0607)

作者简介: 孙悦超, 教授, 博士, 主要从事土壤风蚀测试与控制 and 机电工程技术研究, E-mail: yuechaosun@sina.com

通讯作者: 陈智, 教授, 主要从事能源与环境控制技术, E-mail: chz6653@sohu.com

引言

土壤风蚀是土地沙化和沙尘灾害发生的根源,是干旱半干旱地区最严重的土地荒漠化问题之一^[1]。我国受风蚀影响土地面积占国土总面积的1/2以上,其中阴山北麓农牧交错区的退化草地和农田尤为严重。近年来,阴山北麓农牧交错区草地退化引起的沙漠化发展迅速,不仅给当地农牧业发展和生态环境带来严重危害,而且还影响到周边地区。以往虽有草地土壤风蚀方面研究,但主要集中于野外草场风蚀观测和草地恢复、工程修复等宏观方面。而从草原植被变化对近地表风速影响效果方面来研究草地风蚀机理的资料还鲜见报道^[2-6]。因此,本文利用移动式风蚀风洞及相关测试设备对草原近地表风速廓线和输沙量进行相关测试,进一步分析草地土壤风蚀,为防治其风蚀提供科学依据。

1 试验区概况

试验区位于阴山北麓农牧交错区的包头市达茂旗召河草原。该区年平均降水量150~250 mm,年平均气温2~5℃,大于或等于10℃积温2200~3000℃。每年风速为8 m/s以上的天数有35 d左右,为典型的荒漠化草原,是温带干旱地区代表性草地类型。土壤主要为棕钙土,肥力较低,有机质质量分数一般低于2%。植物种类组成比较简单,每平方千米有10~15种。由于气候条件比较恶劣、植物生长较差、生产力较低,植物以多年生禾本科如针茅(*Stipa gaudis*)、扁穗(*Agropyron cristatum*)和冰草(*Cyperus compressus*)为主^[7-10]。草群高度一般10~25 cm,总盖度15%~30%,平均产草量500 kg/hm²左右,退化严重的草场不足150 kg/hm²,但高的可达1000 kg/hm²。

2 测试设备及方案

2.1 试验设备

主要设备为内蒙古农业大学研制的OFDY-1.2型直流吹气式可移动风蚀风洞和相关配套设备组成^[11]。风洞由风机段、整流段、收缩段和试验段组成。经中国科学院寒旱区研究所鉴定,该风洞结构符合低速风洞设计要求,在试验段模拟的自然风风速廓线与真实地表基本一致。风速范围在0~20 m/s连续可调,风速由风速廓线仪采集后通过数据采集卡传给以LabWindows/CVI作为平台开发的数据采集软件,并显示、记录、保存于计算机中。风洞总体结构如图1所示。

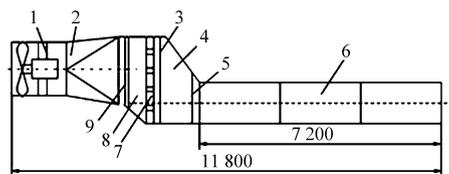


图1 风洞总体结构简图

Fig.1 Schematic of movable wind tunnel

1. 风机段 2. 整流段 3. 阻尼网 4. 收缩段 5. 平行棒栅 6. 试验段 7. 蜂窝器 8. 宽角扩散段 9. 多孔板

测试时在风洞试验段内并搭配附属设备进行,附属设备主要有风速廓线仪和风洞集沙仪等。试验时将风速廓线仪安放在距风洞出口1800 mm、距风洞内侧壁300 mm处,选距地表25、50、100、400、600 mm 5个高度作为风速采集点进行测试以获取草原地表风速廓线。

风速廓线仪由皮托管组、支架、挡板和保护箱体组成,结构细长,挡板迎风面设计成楔形结构,在风洞流场中进行数据采集时可减少对风洞原始流场的扰动和影响,从而确保采集的数据能够真实地反映风洞的流场品质。风速廓线仪的皮托管在垂直方向上的固定方式按对数坐标排列,可同时完成多个测点的风速采集,风速廓线仪如图2所示。

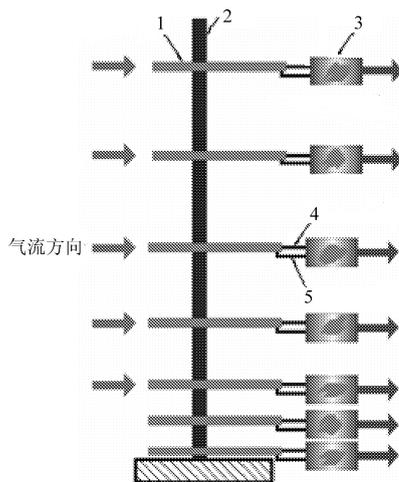


图2 风速廓线仪

Fig.2 Wind speed sampler

1. 皮托管探针 2. 支架 3. 压差传感器 4. 皮托管总压 5. 皮托管静压

采用旋风分离式集沙仪进行风蚀物采集,集沙仪由气流管、旋风分离器、防护罩、集沙盒和支撑座等组成。集沙仪高840 mm,沿高度方向分布10个气流管,通过气流管可收集到垂直方向上10个高度(20、80、140、200、260、360、460、560、660、760 mm)的风蚀量,气流管宽为10 mm、高为30 mm,集沙仪结构如图3所示。测试时将集沙仪放置在风洞轴线距出口1200 mm处,集沙仪收集到的风蚀物由精度为千分之一的电子天平称量。

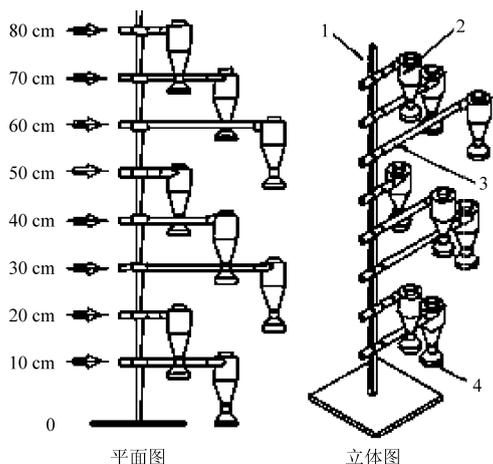


图3 集沙仪

Fig.3 Sand sampler

1. 支架 2. 旋风分离器 3. 气流管 4. 集沙盒

2.2 方案与方法

鉴于研究区气候和风蚀特征, 试验选择在植被未返青土壤风蚀最严重的春季进行。测试期间自然风力为7级(13.9~17.1 m/s)左右, 大气平均温度为8.5℃, 大气平均压力为823 kPa, 地表5 cm深度土层平均含水率为2.1%。由于植被枯萎贴在地层表面, 不把植被高度作为考察因素, 只将植被盖度和风洞中心风速作为试验因素, 以风蚀输沙率为试验指标, 将草地设计成30%、55%和80%的植被盖度, 每种植被盖度对应7、11、15 m/s共3种不同风速。每次试验10 min, 取6次结果的平均值。风速选择是考虑到研究区域土壤风蚀的起沙风速平均值为6 m/s左右, 所选择的3种风速与试验区的自然风速也具有很好的一致性。植被盖度是植被垂直投影面积占地表总面积的百分比, 植被盖度为压线法测取的6次平均值。

2.3 数据处理

输沙率是指风沙流在单位时间内单位面积上运输的沙量, 是衡量土壤风蚀程度的重要指标之一。通过风蚀风洞原位测试方法, 获取被测试草地不同高度处的输沙量。将输沙量随高度的变化进行曲线拟合, 获得输沙量 q 随高度变化的拟合方程, 然后对拟合方程通过式(1)利用Matlab求积分来计算风洞内被吹蚀过地表面积的总输沙量, 将总输沙量除以实际吹蚀过的地表面积和吹蚀时间即可算出草地风蚀输沙率。

$$Q = w \int_0^{70} q dx \quad (1)$$

式中 Q ——吹蚀10 min通过风洞洞口70 cm × 100 cm横截面积的风蚀量, g

w ——风洞试验段宽度, cm

q ——各高度输沙量, g/cm²

x ——距地表高度, cm

3 结果与分析

3.1 草地覆盖对近地表风速廓线的影响

风速廓线作为衡量近地表风速分布规律的一个主要指标, 对研究草地土壤风蚀机理具有重要作用。图4为80%植被盖度下3种风洞中心风速下的风速廓线, 图5为风洞中心风速为11 m/s时3种不同植被盖度的风速廓线。

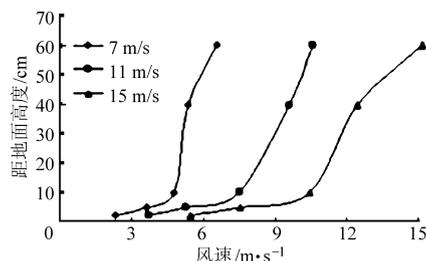


图4 植被盖度为80%时不同风速下的风速廓线

Fig.4 Velocity profile of different wind speeds in 80% vegetation coverage

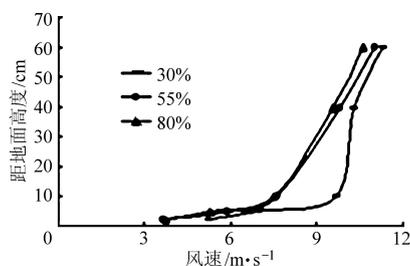


图5 风速11 m/s时不同植被盖度的风速廓线

Fig.5 Velocity profile of different vegetation coverage at 11 m/s wind speed

曲线拟合结果显示, 风沙活动层中风速随高度的分布总体上呈指数规律, 植被下部风速随高度的增长发生急剧变化, 而上部则渐趋平缓。随植被盖度的增加, 近地表一定高度的风速逐渐减小。以风洞中心风速11 m/s为例, 当植被盖度为30%、55%和80%时, 距地表5 cm高度处的风速分别为6.85、5.89、5.29 m/s, 相对于风洞中心风速的风速降低率分别为37.73%、46.45%、51.91%, 植被盖度越大, 植被高度以下气流遇到的阻力越大, 风动量降低得越多, 风速就会进一步减小, 风蚀就会相应减少。综上所述, 随草地植被盖度的增加, 近地表气流的削弱与阻挡效果增强, 从而有效抑制和减少土壤风蚀。

3.2 草地输沙量随高度的变化

根据试验测试结果, 将集沙仪各高度的输沙量用Matlab软件通过多种函数形式进行曲线拟合并考察评价指标精度。得到不同植被盖度草原地表在0~70 cm高度范围内输沙量与高度的关系以指数函数拟合效果好, 拟合曲线函数为

$$q = ae^{bz} \quad (2)$$

式中 z ——集沙仪进沙口高度, cm

a 、 b ——拟合系数

表 1 是风洞中心风速为 11 m/s、植被盖度为 30%、55% 和 80% 时的输沙量拟合方程系数和拟合精度评价指标。

表 1 草地输沙量随高度变化的拟合方程系数和精度
Tab. 1 Fitting equation ratio and precision of changes of grassland sediment discharge with height

植被 盖度 /%	拟合系数		拟合精度指标		
	a	b	误差 平方和	相关 系数	误差 均方根
30	0.024 060	-0.088 60	1.466×10^5	0.965 2	0.001 354
55	0.011 030	-0.058 79	5.34×10^6	0.948 5	0.000 817
80	0.008 738	-0.069 86	9.57×10^6	0.851 2	0.001 094

根据拟合方程作出 3 种植被盖度下草地输沙量随高度的变化曲线(风洞中心风速为 11 m/s)如图 6 所示。由图 6 可见,随距地表高度的增加 3 种植被盖度草地的输沙量均逐渐减少,输沙量主要集中在近地表 30 cm 高度以下。3 条曲线的拐点基本都出现在 5~10 cm 高度范围内,在拐点高度以上输沙量随高度的增加接近线性关系减少,而在拐点高度以下输沙量增加较快,输沙量也较大。这证明草地风沙运动越接近地表输沙量越大,且主要集中在 5~10 cm 高度以下。

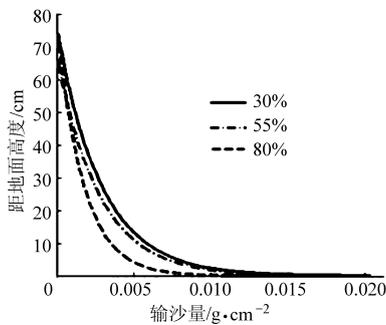


图 6 风洞中心风速为 11 m/s 时不同植被盖度草地输沙量拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of grassland sediment discharge with wind speed of 11 m/s

在风速不变的情况下,随植被盖度的增加,集沙仪不同高度的输沙量均有不同程度的减少。

根据式(1)计算出 11 m/s 风速下 3 种植被盖度

草地在 0~70 cm 高度范围内的输沙率分别为 27.10、18.46 和 12.41 g/(h·m²),植被盖度 55%、80% 的草地相对于植被盖度 30% 的草地输沙率分别减少 48.75% 和 118.37%。说明增加植被盖度在降低草地土壤风蚀过程中具有重要作用。

3.3 草地有效防风蚀植被盖度的确定

从图 5 可以看出,在地表 10 cm 以下时,植被盖度为 55% 和 80% 的草地风速基本一致且明显低于同等条件下植被盖度为 30% 草地的风速。当植被盖度达 80%,草地基本达到了无退化草地状态,已经具备了很强的防风蚀能力。从对风速的阻挡效果来看,植被盖度 55% 的草地具备了这种防御能力,从而有效控制风蚀。

另外,从图 6 还可以看出,植被盖度为 55% 和 80% 的草地输沙量曲线也非常接近,但两者与植被盖度 30% 的草地输沙量曲线较远,而植被盖度 80% 的草地防风蚀良好,但植被盖度 30% 的草地已经退化得比较严重,防风蚀能力极差。因此,50% 植被盖度是当地有效防风蚀的草原植被盖度。

4 结论

(1) 不同植被盖度草地风速廓线总体上呈指数分布规律,植被下部风速随植被高度的增加发生急剧变化,而上部风速变化则渐趋平缓。植被盖度越大,植被高度以下气流遇到的阻力越大,风动量降低得越多,风速就会进一步减小,风蚀就会得到相应的减少和抑制。

(2) 随地表高度的增加不同植被盖度草地的输沙量都呈现出逐渐减少的变化规律,即越接近地表输沙量越大,大多集中在近地表 30 cm 高度以下。增加植被盖度在降低草原土壤风蚀过程中具有重要作用,55% 和 80% 植被盖度的草地相对于植被盖度 30% 的草地输沙率分别减少 48.75% 和 118.37%。

(3) 植被盖度为 55% 的草地对地表 10 cm 及以下高度的近地表风速阻挡效果与植被盖度 80% 的草地类似,其输沙量曲线与植被盖度 80% 的草地输沙量曲线很近,但距盖度 30% 的退化草地输沙量曲线较远。因此,采取生态修复措施将阴山北麓草地植被盖度恢复到约 50%,则可以有效防治当地土壤风蚀。

参 考 文 献

- 孙悦超. 内蒙古后山地区不同地表覆盖条件下土壤抗风蚀效应测试研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
Sun Yuechao. Test research on soil resistance to wind erosion effect in the different surface coverage in houshan area of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- Wang X, Wang T, Dong Z, et al. Nebkha development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 129~141.

- 3 Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Gong Jirui, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 75:53 ~ 59.
- 4 Maurer T, Herrmann L, Gaiser T, et al. A mobile wind tunnel for wind erosion field measurements [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66:257 ~ 271.
- 5 Jordan S Borak, Michael F Jasinski, Richard D Crago. Time series vegetation aerodynamic roughness fields estimated from moths observations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135:252 ~ 268.
- 6 Daniel E Buschiazio, Ted Oobeck, Sergio A Bascal. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69:29 ~ 39.
- 7 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 北方农牧交错区草原地表土壤风蚀原位测试技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6):49 ~ 54.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6):49 ~ 54. (in Chinese)
- 8 陈智, 麻硕士, 赵永来, 等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):118 ~ 122.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):118 ~ 122. (in Chinese)
- 9 麻硕士, 陈智. 土壤风蚀测试与控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 10 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 旱作农田近地表风沙运动与防风蚀效果[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1):54 ~ 58.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Drought farmland near surface blown sand and wind erosion controlling effect [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1):54 ~ 58. (in Chinese)
- 11 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8):156 ~ 159.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Effect elements research on anti-wind erosion of conservation tillage farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8):156 ~ 159. (in Chinese)
- 12 Chen Zhi, Cui Hongmei, Wu Pei, et al. Study on the optimal intercropping width to control wind erosion in north China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 110:230 ~ 235.

~~~~~

(上接第 121 页)

- 9 张德生, 沈冰, 沈晋, 等. 稳态条件下土壤溶质运移的两区模型及其解析解[J]. *水利学报*, 2003, 34(10):44 ~ 50.  
Zhang Desheng, Shen Bing, Shen Jin, et al. Two-region model for solute transport in soil under the condition of steady flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(10):44 ~ 50. (in Chinese)
- 10 冯绍元, 高光耀, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的抽水井附近溶质运移模型及半解析解[J]. *水利学报*, 2010, 41(9):1 024 ~ 1 031.  
Feng Shaoyuan, Gao Guangyao, Huo Zailin, et al. Semi-analytical solution for reactive solute transport in the convergent flow to an extraction well considering scale-dependent dispersion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9):1 024 ~ 1 031. (in Chinese)
- 11 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.  
Guo Huirong. The experimental study and numerical simulation of groundwater recharge processes and preferential solute transport in soils[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- 12 朱磊, 杨金忠, 岳卫峰. 水流在土壤大孔隙中运动的数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(3):20 ~ 23.  
Zhu Lei, Yang Jinzhong, Yue Weifeng. Numerical simulation of the transport of water in soil with macropores[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(3):20 ~ 23. (in Chinese)
- 13 张小娜. 大孔隙土壤的产汇流模型和溶质流失模型研究及实验验证[D]. 南京: 河海大学, 2009.  
Zhang Xiaona. Study on runoff yield and concentration model and solute loss model in macroporous soils and experiment verification[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- 14 盛丰, 张仁铎, 刘会海. 基于分形理论的土壤优先流运动控制方程[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):52 ~ 56.  
Sheng Feng, Zhang Renduo, Liu Huihai. Governing equations for modeling preferential flow in unsaturated soil based on fractal theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):52 ~ 56. (in Chinese)
- 15 Wilton Pereira da Silva, Jürgen W Precker, Cleide M D P S e Silva, et al. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: application to the drying of rough rice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(3):302 ~ 308.
- 16 童菊秀, 杨金忠, 暴入超. 非饱和土中溶质地表径流迁移模型及解析模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1):10 ~ 17.  
Tong Juxiu, Yang Jinzhong, Bao Ruchao. Model for chemicals transfer to surface runoff in unsaturated soil and its analytical modeling[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1):10 ~ 17. (in Chinese)
- 17 陆乐, 吴吉春, 王晶晶. 多尺度非均质多孔介质中溶质运移的蒙特卡罗模拟[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3):333 ~ 338.  
Lu Le, Wu Jichun, Wang Jingjing. Monte Carlo modeling of solute transport in a porous medium with multi-scale heterogeneity [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3):333 ~ 338. (in Chinese)
- 18 李国勇. 神经模糊控制理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009:286 ~ 309.