

东北地区土壤温度和湿度空间变异特性研究*

安晓飞^{1,2} 孟志军^{1,2} 王培^{1,2} 付卫强^{1,2} 郭建华^{1,2}

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 于2015年4月在黑龙江农垦赵光农场,使用20套无线传感器网络节点部署在赵光农场一面积为33.4 hm²的玉米地块,并通过2个手持式移动节点进行加密测量。根据这一方案,获得了从4月5—29日在240 m × 240 m、120 m × 120 m、60 m × 60 m和30 m × 30 m网格下的土壤温度和土壤湿度数据。在此基础上,基于统计半方差函数理论和GIS空间Kriging插值方法分别分析了土壤温度和土壤湿度各向同性、各向异性变化特征及分布模式。结合土壤温度和土壤湿度在不同尺度下的Kriging插值结果,确定了两者最佳采样间距。试验结果表明,土壤温度和土壤湿度的半方差函数分别适用于球形模型和指数模型,两者均有很强的空间自相关。其中,土壤温度自相关距离为51.56 m,土壤湿度的自相关距离为154.16 m。土壤温度在45°、90°方向变化明显大于0°、135°方向;土壤湿度拟合决定系数(R^2)为0.77,在0°、135°方向上变化较大,土壤温度和土壤湿度最佳采样间距分别为60 m和100 m。

关键词: 土壤温度 土壤湿度 时空变异 地统计学

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0304-05

Spatial Variability of Soil Temperature and Moisture in Northeast China

An Xiaofei^{1,2} Meng Zhijun^{1,2} Wang Pei^{1,2} Fu Weiqiang^{1,2} Guo Jianhua^{1,2}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to achieve the maize sowing time decision-making and improve the effective accumulated temperature of maize growth, it is needed to understand the soil spatial variability characteristics. Totally 20 sets of wireless sensor network nodes were deployed in Zhaoguang Farm in Heilongjiang Province for one month in 2015. In addition, two handheld mobile sensor nodes were chosen to increase the measurement number. According to the method, soil temperature and moisture data were obtained from 5th to 29th in April with 240 m × 240 m, 120 m × 120 m, 60 m × 60 m and 30 m × 30 m grids. The isotropic and anisotropic variation characteristics and distribution patterns of soil temperature and moisture were analyzed based on statistics semivariance function theory and GIS space Kriging interpolation method. Experimental results showed that the semivariance of soil temperature and moisture were suitable for the spherical model and exponential model, respectively. Both of them had strong spatial autocorrelation. The distribution of soil temperature was block with autocorrelation distance of 51.56 m. And the distribution of soil moisture was ribbon with autocorrelation distance of 154.16 m. The anisotropy of soil temperature and moisture variation was also significant. The soil temperature variations in 45° and 90° directions were significantly greater than those in 0° and 135° directions. The soil moisture determination coefficient (R^2) was 0.77 with significant variations in 0° and 135° directions. The research results provided a scientific guidance for the decision-making of maize seeding time and the determination of soil sampling distance.

Key words: Soil temperature Soil moisture Spatial and temporal variation Geostatistics

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-17

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101901)

作者简介: 安晓飞, 助理研究员, 博士, 主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: anx@nrcita.org.cn

引言

土壤属性空间变异性研究是开展精准农业实践的基础,可以为农田的精准施肥、精准灌溉、喷药及其它农田精细化管理提供依据^[1]。土壤温度、土壤湿度的区域特征和空间变异直接影响着土壤养分的运移、浅层地表的热状况、生态环境和生物的空间分布^[2]。

近年来,国内外许多学者^[3-15]将地统计学理论应用于土壤科学,采用半方差函数和 Kriging 插值法进行土壤空间特性研究。李兴等^[3]分别在覆膜和不覆膜 2 种处理方式下,探讨了内蒙古准格尔旗试验站玉米地垂直方向上土壤温度的空间变异;王卓然等^[4-5]利用统计分析、GIS 空间插值、实地观测与数据分析对比等方法,研究分析了黄三角地区夏季土壤水盐状况及其微域变异规律。黄魏等^[6]基于地形单元的空间预测有效地获取了土壤有机质空间特征,利用地形分区获取了较高精度的有机质空间分布,进一步探讨了有机质地统计学研究中地形的协同影响;谷加存等^[7]运用方差分析和地统计学相结合的方法,对东北林业大学帽儿山试验场尖砬沟森林培育试验站的土壤表层温度空间变异进行了研究。

东北春玉米是对温度比较敏感的作物,尤其是从播种到出苗期间,对土壤温度有着较高的要求,玉米播种期直接决定了能否充分利用生长期内的温度、雨水和光照,而土壤温度和土壤湿度是影响玉米播种期决策最重要的 2 个因素。为了探索黑龙江农垦地区玉米适宜播期,充分利用有效积温,本文对土壤温度和土壤湿度的空间变异特征进行定量研究,探究土壤温度和湿度空间变异的程度、尺度以及方向性,确定能够保证以足够精度反映土壤温度和湿度分布空间差异性的最大采样间距。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

研究区域位于黑龙江农垦赵光农场,土壤类型主要有 4 种,分别是棕壤土、草甸土、黑土和沼泽土,其中黑土面积占总耕地面积的 57.4%。地处中高纬度,属寒温带季风气候,年平均气温为 0.5℃,无霜期 120 d 左右。年降水量 570 mm,年平均日照时数 2 700 h 以上。试验区域选择黑龙江农垦赵光农场一玉米地块,面积为 33.4 hm²,试验区地处东经 126.73°,北纬 48.03°,海拔高度最小值为 301.56 m,最大值为 317.14 m,总体地势为西南高,东北低。根据前期土壤检测结果,按照全国第 2 次土壤分类

标准(各分 6 级,1 级最高,6 级最低),氮素、速效磷、速效钾和有机质含量分别属于 5 级、3 级、2 级和 1 级,其中氮素和有效磷属于中等变异,有效钾和有机质变异程度较低,整体土壤肥力按照土壤肥力公式得分 66 分(满分 100 分,分为 5 个等级,包括极高、高、中、低和极低),土壤肥力属于中等水平。

1.2 样本采集方法

试验采用 20 个无线传感器节点,监测试验区域内土壤温度、土壤湿度、空气温度和空气湿度,按照 60 m × 60 m 网格部署,无线传感器部署方案如图 1 所示,表 1 是各传感器测量精度和范围。利用土壤温度传感器和土壤湿度传感器监测耕层 5 cm 深处数据,空气温湿度传感器监测距地面 1.5 m 高处的数据,所有节点数据每隔 5 min 上传服务器一次,同时设计了加密测量试验,使用手持移动式土壤温湿度、空气温湿度监测节点进行加密测量,按照 30 m × 30 m 网格进行测量,加密测量样本点如图 1 所示。无线节点监测时间为 4 月 5—29 日,共 25 d,加密测量时间为 4 月 14—22 日,共 9 d。



图 1 采样点分布方案

Fig. 1 Sampling points distribution scheme

表 1 各传感器技术参数

Tab. 1 Parameters of sensors

参数	分辨率	测量精度	测量范围
土壤温度/℃	0.1	±0.5	-40~80
土壤湿度/%	0.1	±1.0	0~100
空气温度/℃	0.1	±0.3	-40~80
空气相对湿度/%	0.1	±0.3	0~100

1.3 数据处理方法

数据均采用样本均值加减 3 倍标准差来识别奇异值,在此区间外的数据均定义为奇异值,分别使用正常的最大值和最小值替代,后续的计算分析均采用处理后的原始数据。土壤温度和土壤湿度的经典描述性统计分析在 SPSS 16.0 软件中完成,用 K-S 检验法进行非参数检验,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。空间自相关分析(采用 Moran's I 系数法)、半方差变异函数分析、模型模拟优化和块金方差值 C_0 、基台值 $C_0 + C$ 、 $C_0/(C_0 + C)$ 、变程 A 、决定系数

R^2 、残差 RSS 等参数的计算均在 GS + 9.0 统计软件中完成, Kriging 等值线图绘制采用 ArcGIS 9.0 软件。确定最优模型时,在块金方差值、基台值、变程、 R^2 和 RSS 5 个参数中,首先考虑 R^2 ,其次是 RSS,最后考虑变程和块金方差值。半方差函数的计算公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (1)$$

式中 $\gamma(h)$ ——所有空间相距为 h 点对的平均方差
 $N(h)$ ——在空间上具有相同间隔距离 h 的点对数目

$Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h)$ ——点 x_i 与点 x_i 相距 h 点的某一属性或因子的观测值

以 $\gamma(h)$ 为纵坐标, h 为横坐标, 绘制曲线, 即为半方差图。

2 结果讨论与分析

2.1 土壤温度和土壤湿度经典统计分析

以 4 月 21 日数据为例, 表 2 是土壤温度和土壤湿度的经典统计分析, 从表 2 中可知无线传感器网络节点土壤温度变化范围为 1.80 ~ 5.70℃, 偏度为 0.02, 数据符合正态分布; 无线传感器网络节点土壤湿度变化范围为 9.26% ~ 30.00%, 偏度为 0.76。变异函数的计算一般要求数据符合正态分布, 否则可能会产生比例效应。比例效应的存在会使实验变异函数产生畸变, 使基台值和块金值抬高, 增大估计误差, 因此比例效应应该消除。在 GS + 9.0 地统计软件中将不服从正态分布的数据转换为服从或者接近正态分布, 转换后的数据满足地统计分析的假设条件。

2.2 土壤温度和土壤湿度空间变异特征

对 4 月 21 日土壤温度数据进行半方差分析, 通过多次对比选择, 选取决定系数最大、残差最小的模型, 最后确定土壤温度半方差拟合模型最优为球状模型(表 3)。从图 2a 可以看出, 在该模型下, 土壤

温度表现出强烈的空间自相关, 自相关距离达到 51.56 m, 土壤温度变异的各向异性也都比较显著。在东北-西南 45°、南北 90° 方向变异程度明显大于东西 0°、东南-西北 135° 方向。在土壤温度半方差函数中, 块金值为 0.26, 基台值为 2.77, 块金值较小, 说明在小范围内空间变异很小, 采样点可以间隔一定的距离。

从图 2b 中可以看出, 土壤湿度的最佳拟合模型都为指数模型, 拟合的决定系数达到 0.77, 块金值为 3.46, 基台值为 27.20。块金值和基台值比为 0.13, 说明相关性属于强烈空间自相关, 变异主要受结构性变异制约, 随机变异带来的影响较小, 变程为 154.16 m, 在此范围内具有空间自相关性, 超出此范围空间自相关性消失。

表 2 土壤温度和土壤湿度经典统计分析

Tab. 2 Classical statistical analysis of soil temperature and moisture

参数	样本数	最小值	最大值	中位数	平均值	方差	偏度
ST/℃	63	1.80	5.70	3.12	3.10	0.18	0.02
SM/%	63	9.26	30.00	14.60	15.62	0.81	0.76

注: ST 是无线节点土壤温度; SM 是无线节点土壤湿度。

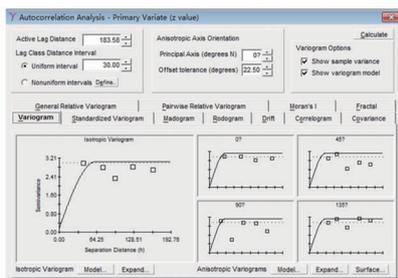
表 3 土壤温度和土壤湿度拟合模型

Tab. 3 Semivariogram models of soil temperature and moisture

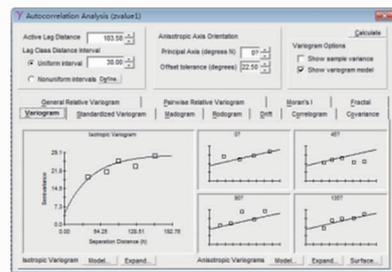
参数	理论模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数	残差
温度	球状	0.26	2.77	0.09	51.56	0.58	0.33
湿度	指数	3.46	27.20	0.13	154.16	0.77	15.20

2.3 土壤样本采样最优间距

首先使用 ArcGIS 9.0 把经纬度转换为平面坐标再进行数据处理。在导入数据以后, 进行数据的缺失值检验, 剔除部分异常值。在 30 m × 30 m、60 m × 60 m、120 m × 120 m 和 240 m × 240 m 网格区域下, 使用 Kriging 插值法进行土壤温度和土壤湿度插值, 获得相应的土壤温度空间分布图和土壤湿度空间分布图(图 3、4)。其中, 土壤温度在 60 m ×



(a)



(b)

图 2 土壤温度和湿度半方差函数

Fig. 2 Semivariogram models and parameters of soil temperature and moisture

(a) 土壤温度 (b) 土壤湿度

60 m 的空间分布和 30 m × 30 m 的空间分布规律较为相似,只有东南部分的土壤温度信息没有准确反映,但是与 120 m × 120 m 和 240 m × 240 m 的空间分布图相比较,反映的土壤温度信息较为准确。在置信区间为 95% 时,土壤温度监测精度较高且经济的采样间隔为 60 m × 60 m 网格。

30 m 的空间分布规律也较为相似,歪曲了部分变异特征;而在 120 m × 120 m 网格区域下,北部区域特性没有表达出来,但与 240 m × 240 m 的空间分布图相比较,120 m × 120 m 基本可以反映出土壤湿度的空间分布特征,结合土壤湿度的变程 154.16 m,建议土壤湿度采样间距确定为 100 m × 100 m。

土壤湿度在 60 m × 60 m 的空间分布与 30 m ×

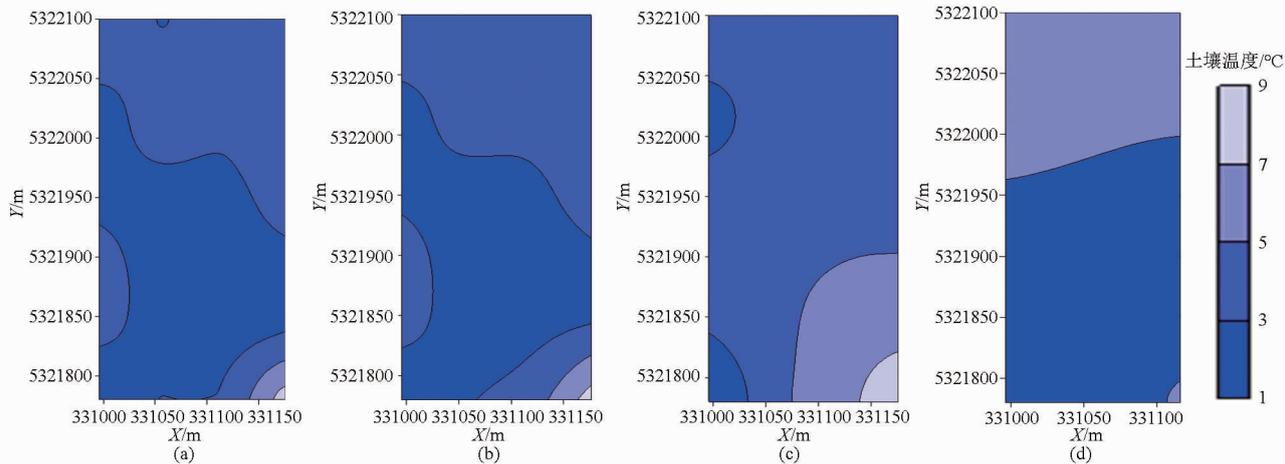


图 3 土壤温度克里格插值结果

Fig. 3 Kiriging interpolation results of soil temperature

(a) 30 m × 30 m (b) 60 m × 60 m (c) 120 m × 120 m (d) 240 m × 240 m

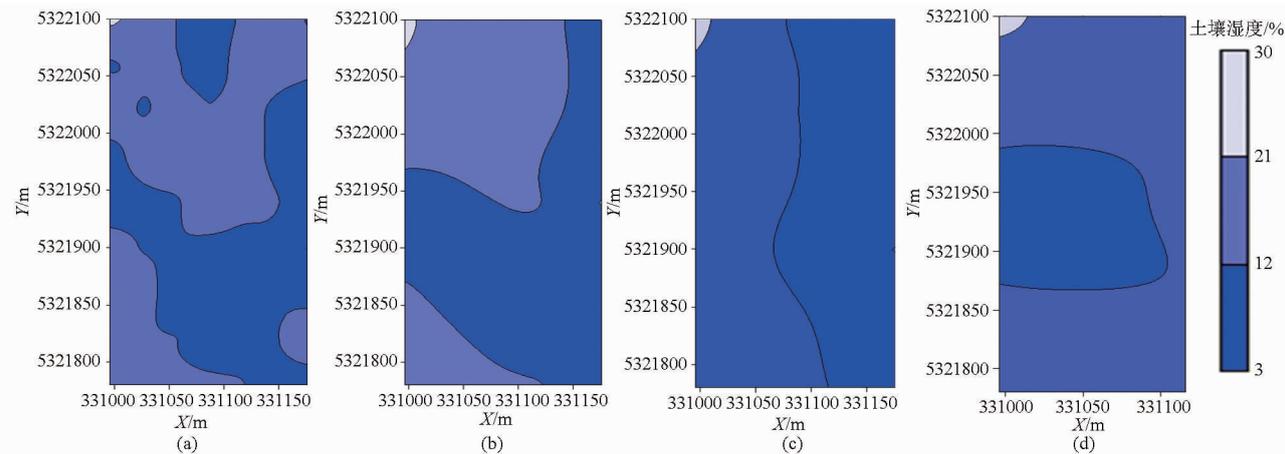


图 4 土壤湿度克里格插值结果

Fig. 4 Kiriging interpolation results of soil moisture

(a) 30 m × 30 m (b) 60 m × 60 m (c) 120 m × 120 m (d) 240 m × 240 m

3 结论

(1)通过对土壤温度和土壤湿度进行半方差分析可知,土壤温度的自相关距离达到 51.56 m,土壤湿度的自相关距离为 154.16 m。当土壤温度采样间隔超出 51.56 m,土壤温度之间不再具有相关性;当土壤湿度采样间隔超出 154.16 m,土壤湿度之间

不再具有相关性。

(2)通过对不同采样间隔下的(30 m × 30 m、60 m × 60 m、120 m × 120 m、240 m × 240 m)土壤温度和土壤湿度分析,采用克里格插值法,建立了不同尺度下的土壤温度和土壤湿度空间分布图。对于土壤温度,60 m × 60 m 是最优采样间距;对于土壤湿度,建议采用 100 m × 100 m 作为最佳采样间距。

参 考 文 献

1 吕雄杰,陆文龙,宋治文,等. 农田土壤温度和水分空间变异研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(6):79-81.
Lü Xiongjie, Lu Wenlong, Song Zhiwen, et al. Study on spatial variability of soil temperature and water in field[J]. Journal of

- Irrigation and Drainage, 2006, 25(6):79-81. (in Chinese)
- 2 高红贝,邵明安. 温度对土壤湿度运动基本参数的影响[J]. 水科学进展,2011,22(4):484-494.
Gao Hongbei, Shao Ming'an. Effect of temperature on soil moisture parameters[J]. Advances in Water Science, 2011,22(4):484-494. (in Chinese)
 - 3 李兴,程满金,勾芒芒,等. 黄土高原半干旱区覆膜玉米土壤温度的变异特征[J]. 生态环境学报,2010,19(1):218-222.
Li Xing, Cheng Manjin, Gou Mangmang, et al. Variation of soil temperature about plastic film mulching maize in semi-arid areas, the loess plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(1):218-222. (in Chinese)
 - 4 王卓然,赵庚星,高明秀,等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(4):154-161.
Wang Zhuoran, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. Characteristics of soil water and salt spatial variations in the spring season in typical yellow river delta area of Kenli County, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015,32(4):154-161. (in Chinese)
 - 5 赵彦锋,化全县,陈杰. Kriging 插值和序贯高斯条件模拟的原理比较及在土壤空间变异研究中的案例分析[J]. 土壤学报, 2011,48(4):856-862.
Zhao Yanfeng, Hua Quanxian, Chen Jie. Comparison of Kriging interpolation with conditional sequential Gaussian simulation in principles and case analysis of their application in study on soil spatial variation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(4):856-862. (in Chinese)
 - 6 黄魏,韩宗伟,罗云,等. 基于地形单元的土壤有机质空间变异研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):161-167.
Huang Wei, Han Zongwei, Luo Yun, et al. Spatial distribution of soil organic matter based on topographic unit[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):161-167. (in Chinese)
 - 7 谷加存,王政权,韩有志,等. 采伐干扰对帽儿山地区天然次生林土壤表层温度空间异质性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 12(12):2248-2254.
Gu Jiacun, Wang Zhengquan, Han Youzhi, et al. Effects of cutting intensity on spatial heterogeneity of topsoil temperature in secondary forest in Maoershan region of Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,12(12):2248-2254. (in Chinese)
 - 8 海南,赵永存,田康,等. 不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响[J]. 土壤学报,2015,52(4):783-791.
Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(4):783-791. (in Chinese)
 - 9 沈掌泉,施洁斌,王珂,等. 应用集成 BP 神经网络进行田间土壤空间变异研究[J]. 农业工程学报,2004,20(3):35-39.
Shen Zhangquan, Shi Jiebin, Wang Ke, et al. Spatial variety of soil properties by BP neural network ensemble[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(3):35-39. (in Chinese)
 - 10 张伟,陈洪松,王克林. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J]. 土壤学报,2006,43(4):554-562.
Zhang Wei, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in karst region in dry season[J]. Acta Pedologica Sinica,2006,43(4):554-562. (in Chinese)
 - 11 杨奇勇,杨劲松,李晓明. 不同阈值下土壤盐分的空间变异特征研究[J]. 土壤学报,2011,48(6):1109-1115.
Yang Qiyong, Yang Jingsong, Li Xiaoming. Spatial variability of soil salinity research under different thresholds[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(6):1109-1115. (in Chinese)
 - 12 尹辉,李晖,蒋忠诚,等. 典型岩溶峰丛洼地土壤温度的空间异质性[J]. 湖北农业科学,2015,64(8):1825-1831.
Yin Hui, Li Hui, Jiang Zhongcheng, et al. Study of spatial variability of soil temperature in typical karst peak cluster-depressions [J]. Hubei Agricultural Sciences,2015,64(8):1825-1831. (in Chinese)
 - 13 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报,2009,46(2):227-234.
Zhang Huizhi, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Seasonal and regional variation of soil temperature in China[J]. Acta Pedologica Sinica,2009,46(2):227-234. (in Chinese)
 - 14 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的空间预测研究[J]. 土壤学报,2009,46(1):1-8.
Zhang Huizhi, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Spatial prediction of soil temperature in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009,46(1):1-8. (in Chinese)
 - 15 李洪建,高玉凤,严俊霞,等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征[J]. 环境科学,2014,35(11):4313-4320.
Li Hongjian, Gao Yufeng, Yan Junxia, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration in a subalpine meadow at different sampling scales[J]. Environmental Science, 2014,35(11):4313-4320. (in Chinese)