

不同采样尺度下土壤碱解氮空间变异性研究 ——以榆树市农田土壤为例

刘吉平, 刘佳鑫, 于洋, 田学智, 徐艳艳

(吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000)

摘要:在精准农业的实施过程中,研究如何用较少的样本来反映田间信息的空间变异规律,再用科学的插值方法进行插值和预估是精准农业研究中的一个关键问题。以东北典型黑土区——吉林省榆树市为研究区域,在榆树市弓棚镇 13 号村内选择相对平整的地块进行土壤采样并测试其土壤养分。在对原始采样格网点按一定的样点间隔和布局进行抽取的基础上,利用克里格插值方法和 BP 神经网络方法分别进行空间插值,比较不同采样尺度(40 m×40 m, 56 m×56 m, 80 m×80 m, 113 m×113 m, 160 m×160 m 五个尺度)对空间插值精度的影响。结果表明:(1)随着采样尺度的增大,碱解氮的空间结构系数 $C/(C_0+C)$ 有减小的趋势,表明采样间距以内的不可估计误差逐渐增大,其空间结构的表现能力在逐渐减弱;(2)Kriging 插值精度总体优于 BP 神经网络,随着采样尺度的增加,两种模型的模拟精度都有所下降,BP 神经网络的插值精度和 Kriging 模型的插值精度的差距逐渐减小;(3)两种模型在 113 m×113 m 尺度上插值精度都发生了突变,如考虑碱解氮的空间变异规律和经济因素,碱解氮的最佳采样尺度应在 80~113 m。

关键词:克里格插值; BP 神经网络; 土壤碱解氮; 采样尺度; 空间变异性

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0106-05

Study on Spatial Variability of Available Nitrogen in Different Sampling Scale ——A Case Study on Cropland Soil in Yushu City

LIU Ji-ping, LIU Jia-xin, YU Yang, TIAN Xue-zhi, XU Yan-yan

(College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

Abstract: During the implementation of precision agriculture, it is a key issue to search for how to use the fewer samples to reflect the spatial variability of the field of information, and then use the scientific method of interpolation and the interpolation to estimate precision agriculture. In this paper, we choose Yushu City, a typical black soil area in northeaster China, which lies in Jilin Province as the study area to select relatively flat soil plots to sample and test soil nutrient in No. 13 village of Gongpeng Town in Yushu City. The original sampling grid networks in accordance with certain intervals samples were taken and layed out based on the use of Kriging interpolation method and BP neural network for spatial interpolation, respectively, compared different scales(40 m×40 m, 56 m×56 m, 80 m×80 m, 113 m×113 m, 160 m×160 m) of spatial interpolation accuracy. The results show that: (1) with the increase of sample size, the spatial structure coefficient $C/(C_0+C)$ of the available nitrogen tends to decrease, indicating that the unpredictable error increases within sampling interval, the performance of its spatial structure the ability to gradually declines; (2) Kriging interpolation accuracy was better than BP neural network. With the increase of sample scale, the simulation accuracy of the two models have decreased, but BP neural network model and Kriging interpolation accuracy and precision of the difference are very small; (3) terms from the Kriging and BP neural network models, from 80 m×80 m to 113 m×113 m scale change process, the average relative error is suddenly decreased, indicating that in the 113 m×113 m precision interpolation scale mutations, considering the spatial variability of available nitrogen and economic factors, the optimal sampling size of available nitrogen

收稿日期:2011-08-26

修回日期:2011-10-06

资助项目:吉林省科技厅科技支撑计划项目(20080207);国家农业科技成果转化资金项目(2009GB2B100095);吉林师范大学研究生创新科研计划项目(201111)

作者简介:刘吉平(1972—),男,山东省菏泽市人,博士,副教授,主要从事资源与环境信息系统研究。Email:liujpjl@163.com

should be between 80 m to 113 m.

Key words: Kriging; BP neural network; available nitrogen of soil; sampling scale; spatial variability

精准农业是近年来农业科学研究的热点领域,在精准农业的实施过程中,需要采集大量的土壤样本,采样尺度会影响到土壤养分特征值的插值结果。在较小采样尺度情况下空间插值的误差较小,但采样尺度过小会花费较多的人力、物力和财力,如果增加采样尺度,人力、物力和财力花费要小,但插值精度又很难保证^[1]。因此,研究合理的采样尺度来反映农田土壤的空间变异规律,再用科学的插值方法进行插值和预估是精准农业研究中的一个关键问题。国内外已有一些专家学者对此进行了研究^[2-13],如 Bloschl 等^[2]提出尺度研究包含采样幅度、采样间距和采样体积 3 个主要内容;Yemefack 等^[3]对潮湿的喀麦隆南部森林的土壤 pH、土壤速效磷和黏粒含量进行了 4 个尺度下的空间变异性研究;赵彦锋等^[11]在 3 种不同采样尺度对比了土壤图法和 Kriging 法对土壤有机质、全氮、全磷、缓效钾和速效钾的估值效果;胡伟等^[12]从变异系数、相关距离和 Moran's *I* 相关指数 3 个方面对黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性的尺度性进行了研究;冯娜娜等^[13]利用地统计学方法,对不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征进行了研究等。以上研究虽然揭示了不同采样尺度下土壤养分的空间变异特征,并依此来确定适宜采样数或采样间距,但没有同时考虑采样尺度和插值方法对土壤养分空间变异性的影响。

本文以东北典型黑土区——吉林省榆树市弓棚镇 13 号村为研究区域,比较不同采样尺度下 Kriging 插值方法和 BP 神经网络方法在模拟土壤养分空间变异性上的差别,为精准农业土壤养分插值方法的选取、制定优化采样策略提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于吉林省榆树市,北纬 44°30'57"—45°15'02",东经 126°01'44"—127°05'09"。研究区地貌类型以平原为主,气温受季风影响,年平均温度为 4℃,日照充足,年均日照时数 2 800 h,无霜期为 130~140 d,有效积温 2 800℃,年均降雨量 620 mm。

榆树市土质肥沃,土壤类型以黑土和黑钙土为主,是典型的东北黑土区。小尺度采样地点位于榆树市西北部的弓棚镇 13 号村,全村 485 户,1 780 口人,土地总面积 460 hm²,其中玉米种植面积 425 hm²,占总面积的 92.4%。该村是国家“863”项目数字农业

示范基地,社会主义新农村建设试点村,是理想的采样实验地。

2 研究方法与数据处理

2.1 Kriging 插值和 BP 神经网络模型

Kriging 插值。以 SPSS 15.0 为平台分析土壤养分的基本统计特征,检验土壤样本是否符合正态分布,对不符合正态分布的数据要进行转换,使之符合正态分布;然后在 GS+ 3.0 下,分析土壤养分的空间变异特性,确定 Kriging 插值所采用的最优模型以及空间变异参数。插值的主体部分以 ArcGIS 9.3 为平台,利用地统计模块中的普通 Kriging 插值方法来模拟土壤养分的空间变异特性^[14]。

BP 神经网络模型。主要用 MATLAB 中的神经网络工具箱通过编写程序来实现 BP 神经网络对土壤养分的模拟^[15]。

2.2 插值精度的检验

采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均相对误差 (\bar{d}) 作为插值精度的衡量指标。其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \quad (1)$$

式中: \hat{Z}_i ——使用克里格插值或 BP 网络模型的预测值; Z_i ——检验样本的实测值; N ——检验数据集的样本数。显然 RMSE 的值越小,则插值的精度越高,误差越小。

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{Z}_i - Z_i|}{Z_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n ——训练样本或者检验样本数;其余参数的意义同上。 \bar{d} 值越小,则插值的精度越高,误差越小。

2.3 数据处理

采样区选在榆树市弓棚镇 13 号村。首先对试验地块进行 DGPS 网格定位,共计 153 hm²,并在 ArcGIS 软件上对其进行网格划分,网格大小为 40 m×40 m 和 80 m×80 m。于 2006 年 10 月份根据划分的网格进行采样,采集的深度为 0—20 cm,采样用梅花五点采样法,将样品混合均匀,以四分法取 1 kg 左右作为该网格土样。将采集的样品装袋后进行标记,带回实验室分析,共采集 386 个样品。将采集的样品装入取样袋,在试验室进行自然风干后磨碎过筛,以便测量碱解氮值。碱解氮采用碱解扩散法,在吉林师范大学化学学院实验室进行样品的化验分析。

选取研究区域中心位置相对规整的地块作为地块 1,其周围的地块作为地块 2,在地块 1 和地块 2 采样点的基础上,提取 40 m×40 m,56 m×56 m,80 m×80 m,113 m×113 m,160 m×160 m 五个尺度的样本数据,分别命名为方案 a、方案 b、方案 c、方案 d 和方案 e。方案 a,以地块 1 的 40 m×40 m 尺度的采样点作为训练样本;方案 b 是在 40 m×40 m(地块 1)采样的基础上,按梅花五点采样法进行提取,得到间距为 $40\sqrt{2}$ m 的采样尺度数据,即 56 m×56 m 尺度数据;方案 c 是在 40 m×40 m(地块 1)采样的基础上,隔行隔列进行提取,获得 80 m×80 m 尺度的采样点数据,和地块 2 的 80 m×80 m 采样数据融合成

完整的 80 m×80 m 尺度;方案 d 是在 80 m×80 m 采样的基础上,按梅花五点采样法进行提取,得到间距为 $80\sqrt{2}$ m 的采样尺度数据,即 113 m×113 m 尺度;方案 e 是在 80 m×80 m 采样的基础上,隔行隔列进行提取,提取出 160 m×160 m 尺度。

3 结果与分析

3.1 基于 Kriging 插值的碱解氮空间变异性

对土壤养分含量数据进行统计特征分析是建立养分含量变异模型的前提和基础,利用 SPSS 软件对不同尺度下土壤养分数据做常规统计分析,结果见表 1。

表 1 不同尺度下碱解氮的基本统计特征分析

尺度/(m×m)	样本数	含量/(mg·kg ⁻¹)			标准差	变异系数	偏度系数	峰度系数
		最小值	最大值	平均值				
40×40	108	97.0	123.8	107.306	5.712	0.053	0.884	0.509
56×56	54	99.4	123.8	107.015	5.450	0.051	1.231	1.464
80×80	177	92.6	151.4	116.292	11.850	0.102	0.496	-0.532
113×113	90	99.4	142.8	116.973	11.482	0.098	0.453	-0.885
160×160	45	97.0	142.8	118.107	11.868	0.101	0.080	-0.991

变异系数的大小表示土壤养分空间变异性的 大小,变异系数≤0.1 时为弱变异性,介于 0.1 和 1 之间时为中等变异性,变异系数≥1 时为强变异性。从分析结果来看,碱解氮的采样数据在 80 m×80 m 和 160 m×160 m 尺度下属于中等变异性,在 40 m×40 m,56 m×56 m 和 113 m×113 m 尺度下属于弱变异性,其中在 80 m×80 m 尺度下的变异性最大。

采用 SPSS 进行单样本 K—S 检验,对不同尺度下的碱解氮含量进行正态分布检验,结果表明:56 m×56 m,113 m×113 m,160 m×160 m 尺度符合正态

分布;40 m×40 m,80 m×80 m 尺度样本符合对数正态分布,满足克里格插值对数据分布状态的要求。

在 GS⁺ 下对不同尺度碱解氮的含量进行半方差分析,得到变异函数的相关参数和最优的变异函数拟合模型,结果见表 2。结果表明:碱解氮在 56 m×56 m,80 m×80 m 尺度下的最优变异函数拟合模型为指数模型,其它尺度下为球状模型。随着采样尺度的增大,碱解氮的空间结构系数 $C/(C_0+C)$ 有减小趋势,表明采样间距以内的不可估计误差逐渐增大,其空间结构的表现能力在逐渐减弱。

表 2 碱解氮在不同尺度下半变异函数参数及拟合模型

尺度/(m×m)	C_0	$C+C_0$	$C/(C+C_0)$	变程/m	最优模型
40×40	7.900	31.490	0.749	57	球状模型
56×56	8.880	28.710	0.691	98	指数模型
80×80	0.302	0.989	0.695	222	指数模型
113×113	0.250	1.013	0.753	209	球状模型
160×160	0.336	0.974	0.655	333	球状模型

根据 GS⁺ 所求出的最大变异距离和选用的模型作为参数,将不同尺度的训练样本在 ArcGIS 下进行 Kriging 插值(图 1)。在地块 1 的全部样本中随机抽取 22 个样本进行精度检验,采用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(\bar{d})作为插值精度的衡量指标,其计算结果见表 3。

检验结果表明随着采样尺度的增加,RMSE 值和 \bar{d} 值在逐渐增加,说明随着采样尺度的增加,Kriging 插值的模拟精度在下降。

表 3 碱解氮在不同尺度下 Kriging 插值精度检验

尺度/(m×m)	分析样本数	取值范围/(mg·kg ⁻¹)	RMSE	$\bar{d}/\%$
40×40	108	97.0~123.8	3.019	2.06
56×56	54	99.4~123.8	4.173	2.22
80×80	177	92.6~151.4	4.376	2.29
113×113	90	99.4~142.8	4.452	3.04
160×160	45	97.0~142.8	6.668	3.32

3.2 基于 BP 网络插值的碱解氮空间变异性

网络输入层为采样点的高斯投影坐标,神经元个数为 2;输出为土壤养分值,神经元数为 1;在网络训练前,先使用 mapminmax 函数对网络的输入和输出数据

进行归一化处理,以加快网络收敛速度。BP 网络隐含层神经元的数目对网络性能有着比较大的影响,本文通过设计一个隐含层神经元数目可变的 BP 网络,通过误差对比,确定最佳的隐含层神经元个数,训练结果表 4。

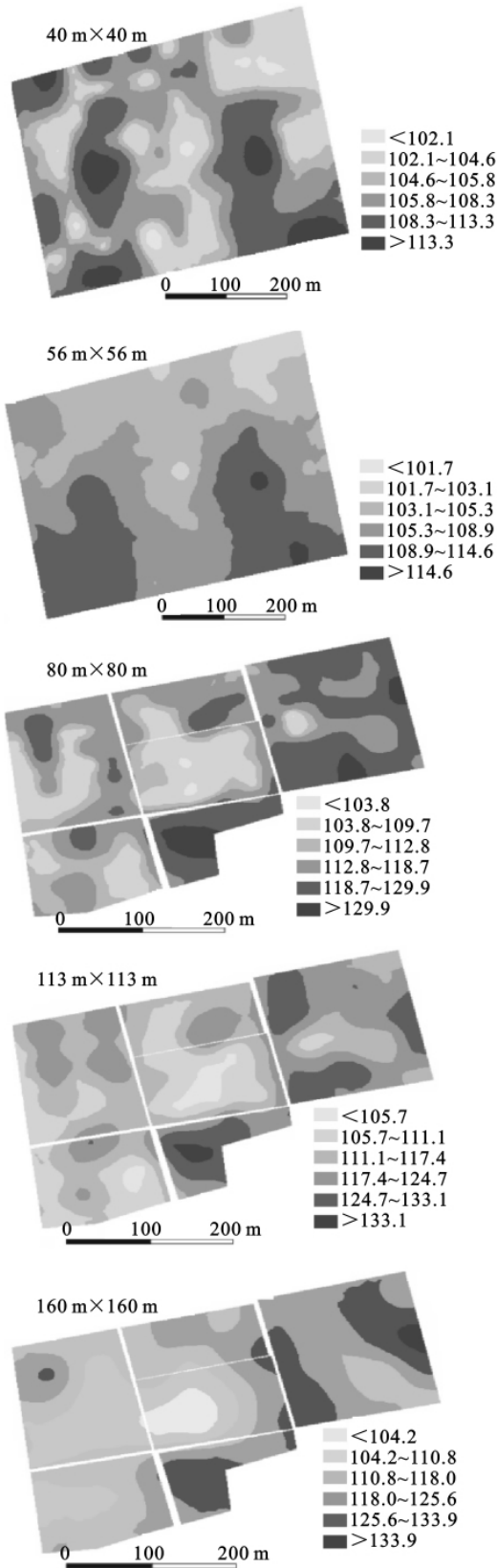


图 1 不同尺度下碱解氮克里金插值效果(单位:mg/kg)

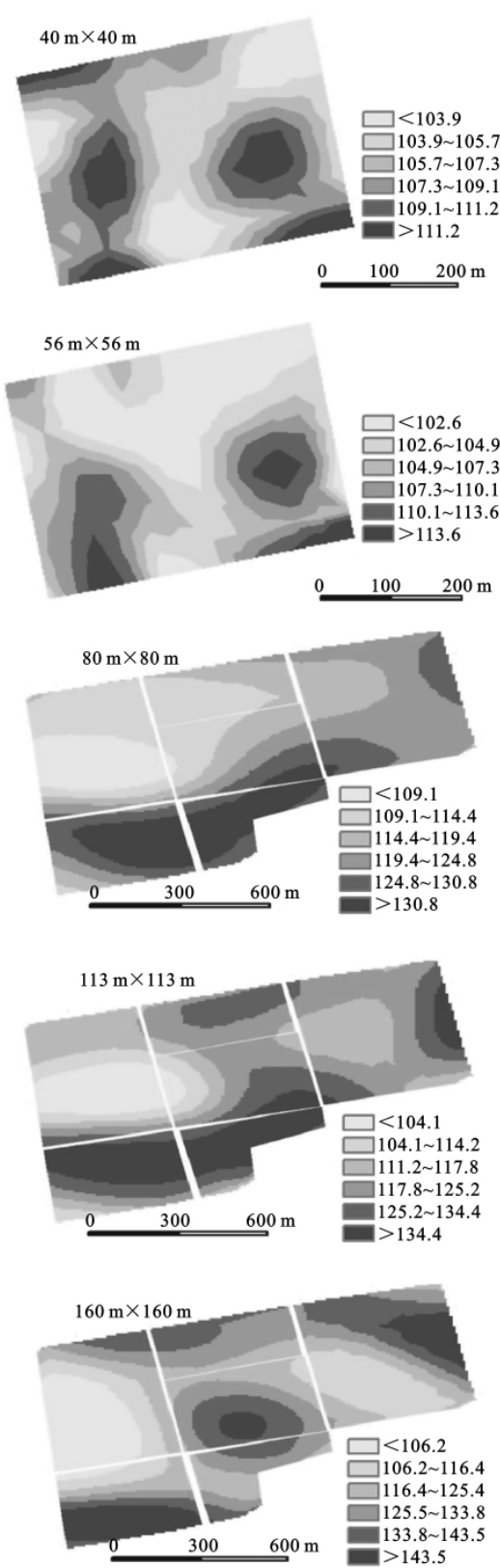


图 2 不同尺度碱解氮神经网络插值效果(单位:mg/kg)

训练结果表明:40 m×40 m 尺度下,碱解氮的最佳隐层神经元数为 11,此时 BP 神经网络对函数的逼近效果最好,但是训练速度较差,需要经过 1 975 次训练才能够达到目标误差。鉴于本文重点研究的是采样尺度对土壤养分数据的模拟精度问题,暂不考虑网络性能的影响,这里将隐含层神经元数设定为 11。

表 4 碱解氮在不同尺度下训练次数与误差分析

尺度/(m×m)	神经元数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40×40	网络误差	0.093	0.081	0.084	0.072	0.063	0.062	0.060	0.055	0.054	0.055
	训练次数	1825	1925	1900	2000	1925	2000	1975	1950	1975	2000
56×56	网络误差	0.077	0.070	0.053	0.044	0.039	0.050	0.043	0.032	0.027	0.028
	训练次数	1925	1950	2000	2000	1975	2000	2000	1950	2000	2000
80×80	网络误差	0.129	0.134	0.119	0.126	0.119	0.119	0.106	0.113	0.105	0.110
	训练次数	1925	2000	2000	1975	1975	1950	2000	2000	2000	1950
113×113	网络误差	0.222	0.223	0.235	0.198	0.192	0.196	0.189	0.170	0.183	0.165
	训练次数	1975	2000	1975	2000	2000	2000	1975	1975	2000	2000
160×160	网络误差	0.104	0.117	0.062	0.044	0.044	0.049	0.047	0.014	0.016	0.007
	训练次数	2000	2000	1950	1975	2000	2000	2000	1950	2000	1975

表 5 碱解氮在不同尺度下 BP 神经网络插值精度检验

尺度/ (m×m)	分析样 本数	取值范围/ (mg·kg ⁻¹)	RMSE	$\bar{d}/\%$
40×40	108	97.0~123.8	5.553	3.51
56×56	54	99.4~123.8	6.409	4.05
80×80	177	92.6~151.4	6.821	4.39
113×113	90	99.4~142.8	8.138	5.41
160×160	45	97.0~142.8	8.217	5.48

结果表明:碱解氮随着采样尺度的增大,RMSE 和 \bar{d} 值都相应增加,模拟精度下降,其中 113 m×113 m 以上尺度精度下降较快。

3.3 两种插值模型精度的比较

本文采用 Kriging 插值方法和 BP 神经网络方法对不同采样尺度下的模型模拟情况进行研究,通过比较两种模型的预测精度,来研究两种模型在不同尺度下的模拟情况,结果见表 6。

表 6 碱解氮在不同尺度下模拟精度比较

尺度/ (m×m)	RMSE		$\bar{d}/\%$	
	Kriging	BP	Kriging	BP
40×40	3.019	5.553	2.06	3.51
56×56	4.173	6.409	2.22	4.05
80×80	4.376	6.821	2.29	4.39
113×113	4.452	8.138	3.04	5.41
160×160	6.668	8.217	3.32	5.48

结果说明,随着采样尺度的增加,两种模型的模拟精度都有所下降,其中 Kriging 插值方法随尺度增大模拟精度下降的速率比较均匀,BP 网络也有精度下降的趋势,但下降速度不恒定。表明在本文所研究的采样尺度变化下,Kriging 插值精度优于 BP 神经网络。从两种模型来看,由 80 m×80 m 到 113 m×113 m 尺度变化过程中,Kriging 的 \bar{d} 值由 4.39%突

按同样的方法,确定 56 m×56 m,80 m×80 m 尺度的最佳隐层神经元数为 11;113 m×113 m,160 m×160 m 尺度的最佳隐层神经元数为 12。

重新构建 BP 神经网络,利用神经网络仿真函数 sim,得到检验样本土壤养分神经网络模拟值如图 2 所示,并对 BP 神经网络的模拟精度进行检验,结果见表 5。

变为 5.41%,BP 神经网络的 \bar{d} 值由 2.29%突变为 3.04%,说明在 113 m×113 m 尺度上插值精度发生了突变,如考虑碱解氮的空间变异规律和经济因素,碱解氮的最佳采样尺度应在 80~113 m。

4 结 论

(1)随着采样尺度的增大,受采样间距以内的不可估计误差的影响,碱解氮的空间结构系数 $C/(C_0+C)$ 有减小趋势,其空间结构的表现能力在逐渐减弱。

(2)Kriging 插值精度总体优于 BP 神经网络。随着采样尺度的增加,两种模型的模拟精度都有所下降,BP 神经网络的插值精度和 Kriging 模型的插值精度的差距逐渐减小。

(3)从两种模型来看,由 80 m×80 m 到 113 m×113 m 尺度变化过程中,Kriging 和 BP 神经网络的平均相对误差突然降低,说明在 113 m×113 m 尺度上插值精度发生了突变,如考虑碱解氮的空间变异规律和经济因素,碱解氮的最佳采样尺度应在 80~113 m。

参考文献:

- [1] 王建军,王长松,殷朝珍,等. 不同采样密度对土壤养分空间插值结果的影响[J]. 江西农业学报,2010,22(7): 87-90.
- [2] Bloschl G, Sivapalan M. Special issue on scale issues in hydrological modelling[J]. Hydrology Processes,1995,9 (3):251-290.
- [3] Yemefack M, Rossiter D G, Njomgang R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in Southern Cameroon [J]. Geoderma,2005,12(5):117-143.

(下转第 115 页)

参考文献:

- [1] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报,2000,24(3):275-279.
- [2] 李新荣,马凤云,龙立群,等.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J].中国沙漠,2001,21(3):217-222.
- [3] 肖洪浪,李新荣,段争虎,等.流沙固定过程中土壤—植被系统演变对水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(6):809-814.
- [4] Berndtsson R, Nodomi K. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185: 221-240.
- [5] 冯起,程国栋.我国沙地水分分布状况及其意义[J].土壤学报,1999,36(2):225-236.
- [6] 石莎,马凤云,刘立超,等.沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响[J].中央民族大学学报:自然科学版,2004,13(2):137-141.
- [7] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1/4):259-281.
- [8] 张继贤,徐斌.科尔沁草原南部不同类型沙丘水分研究[J].中国沙漠,1985,5(3):33-39.
- [9] 陈有君,红梅,李绍良,等.浑善达克沙地不同植被下的土壤水分状况[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):68-73.
- [10] 秦佳琪,托亚,叶冬梅,等.乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J].内蒙古农业大学学报,2004,25(2):23-26.
- [11] 李禄军,蒋志荣,车克钧,等.绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [12] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [13] 李元寿,王根绪,丁永建,等.青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J].水科学进展,2008,19(1):61-67.
- [14] 刘安花,李英年,张法伟,等.高寒矮蒿草草甸植物生长季土壤水分动态变化规律[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):125-130.
- [15] 施雅风,陈梦熊,李维质,等.青海湖及其附近地区自然地理(着重地貌)的初步考察[J].地理学报,1958,24(1):33-48.
- [16] 徐叔鹰,徐德馥.青海湖东岸的风沙堆积[J].中国沙漠,1983,3(3):11-17.
- [17] 师永民,王新民,宋春晖.青海湖湖区风成沙堆积[J].沉积学报,1996,14(增刊):234-238.
- [18] 朱秀莲.海晏县沙化现状调查及治理对策[J].青海草业,2009,18(2):40-42.
- [19] 王翔宇,张进虎,丁国栋,等.沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J].水土保持学报,2008,22(6):222-227.
- [20] 吕贻忠,胡克林,李保国.毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异[J].土壤学报,2006,43(1):152-154.
- [21] 孙建华,刘建军,康博文,等.陕北毛乌素沙地土壤水分时空变异规律研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):244-247.
- [22] 王新平,张志山,张景光,等.荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J].中国沙漠,2005,25(2):196-201.
- [23] 移小勇,赵哈林,李玉霖,等.科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J].水土保持学报,2006,20(2):10-13,53.
- ~~~~~
- (上接第110页)
- [4] Yuan X Y, Chai X R, Gao R T, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter in a county scale agricultural ecosystem[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 1157-1168.
- [5] Liu X M, Zhao K L, Xu J M, et al. Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in Southeast China[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 1139-1147.
- [6] 王淑英,路苹,王建立.不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征:以北京市平谷区为例[J].生态学报,2008,28(10):4957-4964.
- [7] 陈光,贺立源,詹向雯.耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究[J].土壤通报,2008,39(5):1007-1011.
- [8] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等.采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J].土壤通报,2008,41(2):257-262.
- [9] 赵军,刘焕军,隋跃宇.农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J].水土保持学报,2006,20(1):41-45.
- [10] 杨奇勇,杨劲松.不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征[J].水土保持学报,2010,24(3):100-104.
- [11] 赵彦锋,陈杰,齐力,等.不同采样尺度下土壤图和Kriging法的空间估值精度比较[J].土壤通报,2011,42(2):872-878.
- [12] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J].农业工程学报,2005,21(8):11-16.
- [13] 冯娜娜,李廷轩,张锡洲.不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征[J].水土保持学报,2006,20(3):123-128.
- [14] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Tai Wan soil[J]. Soil Science, 1997, 162(4): 151-162.
- [15] Bake L, Euison D. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method[J]. Geoderma, 2008, 144(1/2): 212-224.