

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.019

西南岩溶盆地土壤干容重协同克里格分析^{*}

杨奇勇 张发旺

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 选择我国云南典型的坝子农业区鹤庆盆地为研究区域,用环刀采集表层(0~10 cm)土壤样品114个,测定土壤干容重和土壤含水率。利用经典统计学方法、普通克里格(OK)方法和协同克里格(OCK)方法,研究坝子农业土壤干容重的空间变异特征。结果表明:研究区域土壤干容重变化范围为0.74~1.60 g/cm³,平均值为1.25 g/cm³。在空间分布上研究区域土壤干容重呈现南北低,中东部高的格局,土壤类型、质地和土地利用方式是影响其空间分布的主要因素。土壤干容重和土壤含水率具有显著的相关性,相关系数达到-0.686。Kriging插值分析表明,以土壤含水率为辅助数据,利用OCK法能有效提高土壤干容重的预测精度。

关键词: 土壤干容重 土壤含水率 半方差函数 协同克里格 空间变异

中图分类号: S152.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0126-06

Cokriging Analysis on Soil Bulk Density in Karst Basin of Southwest China

Yang Qiyong Zhang Fawang

(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Heqing basin is a typical dam agriculture area in Yunnan province in Southwest China, which was selected as the study area. 114 soil samples (0~10 cm) were collected in metal cylinders (diameter 5 cm; length 5 cm), and soil bulk density (SBD) and soil water content (SWC) were measured gravimetrically. The classical statistical analysis methods of ordinary Kriging (OK) and ordinary Cokriging (OCK) were used to study the spatial variability of soil bulk density. Results showed that the values of soil bulk density ranged from 0.74 g/cm³ to 1.60 g/cm³, with an average of 1.25 g/cm³. The low value of soil bulk density distributed in north and south regions in the study area, while the high value distributed in mid-east region, which were influenced by soil type, texture and land use in the dam area. Soil bulk density was highly correlated with soil water content and the correlation coefficient between them was -0.686. The spatial variability of soil bulk density was studied using OCK method with soil water content as auxiliary variable, and the prediction accuracy was enhanced by 36.61%.

Key words: Soil bulk density Soil water content Semi-variances Cokriging Spatial variability

引言

土壤干容重是土壤重要的基本物理属性之一,对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力等都有非常大的影响^[1-3]。它既是衡量土壤肥力质量高低的重要辅助标准^[4],也是土壤有机碳储量计算的一个重要参

数。因此,全面掌握区域土壤干容重的空间分布状况,无论是对区域农业管理还是对土壤碳汇的评估,都有着实际的意义。

传统土壤干容重的测量主要通过土壤剖面挖掘,采用环刀法测定。因此,要获取大量样点的土壤干容重数据,野外工作量大,费时、费力。而地统计学方法是研究空间变异最有力的手段^[5-7],亦能有

收稿日期: 2014-04-13 修回日期: 2014-05-25

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAC16B02)和地质大调查资助项目(1212011220958、1212011220959)

作者简介: 杨奇勇,副研究员,博士后,主要从事岩溶区水土资源持续高效利用研究,E-mail: yangqiyong0739@163.com

通讯作者: 张发旺,研究员,博士生导师,主要从事水土资源研究,E-mail: zhangfawang@karst.ac.cn

效地实现空间数据由点向面的尺度扩展。其中最常用的空间插值方法是 OK 法 (Ordinary Kriging), 它可以给出有限区域内区域变量的最佳线性无偏估计量。已有研究表明, 在有限的数量情况下, 利用 OK 法有时难以达到预期的精度。因此, 众多研究者通过利用辅助数据进行 OCK (Ordinary Cokriging) 插值, 有效地提高了土壤属性的预测精度^[8-10]。但是, 当协同变量与自变量相关性不高时, OCK 法对预测精度的提高并不理想^[11-12]。Yates 等^[13]利用 OCK 法进行土壤含水率空间预测研究后指出, 当协同变量与自变量的相关系数大于 0.5 时, OCK 法明显优于 OK 法。

本文以云南省鹤庆县鹤庆坝的“坝子”农业土壤干容重为研究对象, 以土壤含水率为协同变量对其空间变异性进行分析, 通过比较 OK 法和 OCK 法的插值精度, 获取鹤庆坝土壤干容重的空间分布状况, 为高原盆地土壤干容重分析和农业管理提供科学参考。

1 研究区域概况

鹤庆县位于云南省西北部, 地处滇西横断山脉南端、云岭山脉以东, 大理白族自治州北端, 地理坐标为 100°01' ~ 100°29'E、25°57' ~ 26°42'N。东有金沙江与永胜县分津, 南与宾川县接界, 西与剑川县、洱源县接壤, 北与丽江市毗连。全县辖 9 个乡镇, 面积 2 395 km², 其中山区、半山区和峡谷区面积占 89.7%。由于特殊的地理环境, 悬殊的地貌差异, 形成“一山分四季, 十里不同天”的立体气候。

鹤庆坝(鹤庆盆地)位于鹤庆县的北部(图 1), 东西宽 10 km, 南北长 26 km, 总面积约 140 km², 是全县农业经济活动中心。鹤庆坝平均海拔高度 2 196 m, 年均气温 13.5℃, 年降水量 959.5 mm, 属中暖地区。主要土壤类型有水稻土、石灰土和红壤土。主要农作物有玉米、大麦、蚕豆等。鹤庆坝西部的西山, 植被以灌草丛为主, 基岩裸露率高, 石漠化严重, 成片状大面积分布; 鹤庆坝东部的东山, 植被覆盖度高, 主要是马尾松。东山基岩裸露率低, 石漠化程度低, 呈斑块状小范围分布。盆地东、西部边缘有多处地下岩溶泉水涌出, 形成龙潭, 是鹤庆坝重要的水源。

2 研究方法

2.1 样品采集与测定

以鹤庆坝矢量图为边界, 在 ArcGIS 中利用 Creat fishnet 工具进行网格布点, 网格尺寸为 1 km × 1 km。将坐标点输入 GPS 进行野外采样导航。调

查采样时间为 2013 年 8 月底—9 月初。以 GPS 坐标点为中心, 利用 100 cm³ 的环刀在 2 m 范围内呈品字形采集 3 个环刀土样, 采样深度为 0 ~ 10 cm。对样点处微地形地貌、土壤质地、颜色、结构、松紧度等进行判断, 同时对农户进行调查访问, 并记录调查点的土地利用、作物长势、施肥等情况。在实际的采样导航过程中, 若样点落在道路、村庄或水域中, 则在附近 100 m 处进行调整采样。不能调整的采样点舍去, 共采集土壤样点 114 个(图 1)。

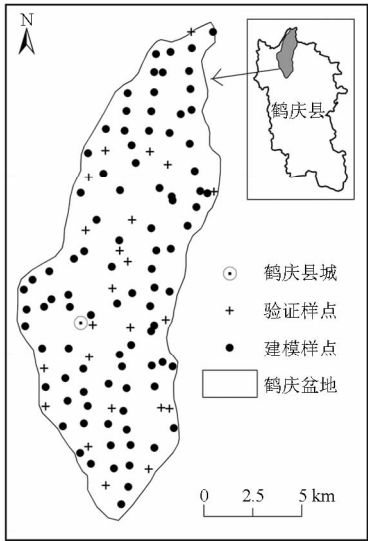


图 1 研究区位置与采样点分布

Fig.1 Investigation location and distribution of sample points

将采集的土壤样品送回实验室, 利用干燥法测定土壤含水率(%)和土壤干容重(g/cm³)。

2.2 数据处理与分析

在 GIS 中利用 Create Subsets 工具将 114 个样点随机分成 2 个数据集: 一个是建模数据集, 用来进行变异函数和协同变异函数模拟、空间插值分析; 另一个为验证数据集, 用来进行插值精度验证。经典统计分析和相关分析在 SPSS 16.0 中完成。土壤干容重的变异函数和协同变异函数在 GS+7.0 中模拟实现。空间插值分析和验证在 ArcGIS 9.2 中完成。地统计分析的方法、原理详见文献[14]。

2.3 插值精度验证

插值精度验证指标主要有 3 个: ①相关系数(r), 反映预测值与实测值的相关性。相关系数越大, 预测精度越高。②平均绝对误差(MAE), 反映预测值偏离验证值的大小, 其值越接近于 0, 精度越高。③均方根误差(R_{MSE}), 介于 0 与 1 之间, 越接近于 0, 预测越准确^[15]。MAE 和 R_{MSE} 的计算式为

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \tag{1}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

(2)

式中 O_i ——实测数据 P_i ——预测数据
 n ——验证数据的数目

3 结果与分析

3.1 土壤干容重和含水率的描述性统计分析

在 ArcGIS 中将样点随机分为建模数据集和验证数据集,其中验证数据样点数占全部样点的 20%。对土壤干容重的 2 个数据集进行统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 土壤干容重的统计分析

Tab.1 Statistical characteristics of soil bulk density

参数	建模数据	验证数据
样品数量	91	23
平均值/(g·cm ⁻³)	1.25	1.22
最小值/(g·cm ⁻³)	0.85	0.74
最大值/(g·cm ⁻³)	1.60	1.46
标准差/(g·cm ⁻³)	0.151	0.166
变异系数/%	12.08	13.61
偏度	-0.19	-0.73
峰度	-0.29	1.11

从表 1 中可以看出,建模数据集和验证数据集的统计特征基本一致。建模数据集中,土壤干容重的平均值为 1.25 g/cm³,变异系数为 12.08%,具有中等强度的变异性。建模数据集中土壤干容重的偏度值为 -0.19,峰度为 -0.29,基本呈正态分布,适合地统计分析。

对研究区域 114 个样点的土壤含水率进行统计分析(图 2),发现土壤含水率平均值为 22.71%,最大值约为最小值的 3 倍。土壤含水率的变异系数为 22.17%,比土壤干容重的变异性略大。从偏度上看,土壤含水率基本呈正态分布。

3.2 土壤干容重的空间结构及其影响因素分析

在 SPSS 16.0 中对建模数据集中 91 个样点的土壤干容重和土壤含水率进行相关分析。结果表明

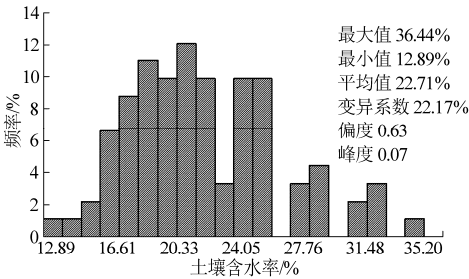


图 2 土壤含水率的统计分析

Fig.2 Statistical characteristics of soil water content

两者成显著的负相关性,相关系数达到 -0.686 ($p < 0.001$)。这说明单位体积土壤含水越多,土壤相对质量越小,所以土壤干容重就越小,这与以往对土壤含水率与干容重的研究结果一致^[16-18]。因此,土壤含水率可以作为协同变量进行土壤干容重的空间变异分析。在 GS⁺7.0 中进行变异函数的反复模拟,发现当步长为 1 100 m 时土壤干容重的变异函数和协同变异函数最稳定。选取决定系数最大的变异函数模型进行土壤干容重的空间结构分析。图 3 为土壤干容重的变异函数和协同变异函数的理论模型和参数图。

从图 3a、3b 可以看出,研究区域土壤干容重和土壤含水率的变异函数都为指数模型,决定系数分别为 0.606 和 0.616,且变程(A_0)内的点基本都落在变异函数理论模型曲线附近,说明选取的模型较为理想,能够反映土壤干容重和土壤含水率的空间结构性^[14]。以土壤含水率作为辅助变量的协同变异函数模型为高斯模型,模型的决定系数为 0.484。3 个变异函数模型的块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)的比值都小于 25%,分别为 14.370%、0.034% 和 0.195%,说明鹤庆坝的土壤干容重和土壤含水率都具有强烈的空间自相关性^[19]。两者的空间异质性主要是由土壤母质等结构性因素引起的。从块金值与基台值的比值来看,土壤干容重的空间自相关性比土壤含水率的空间自相关性稍弱,说明和土壤含水率比较而言,土壤干容重受耕作、施肥等人类活动的影响较大。

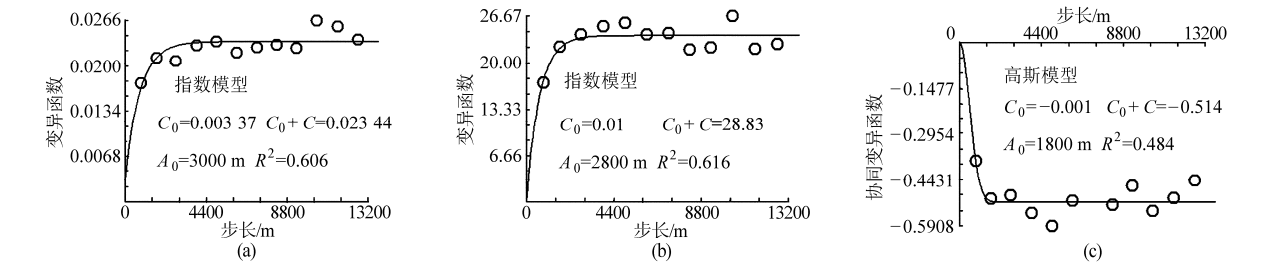


图 3 土壤干容重和土壤含水率的变异函数模型及参数

Fig.3 Semivariance model and parameters referred to soil bulk density, soil water content and cross-semivariance model and parameters

(a) 土壤干容重 (b) 土壤含水率 (c) 土壤含水率为辅助变量

为了更清晰地理解土壤结构因素和随机因素对土壤干容重空间结构特征的影响,对 114 个采样点按不同土壤类型、质地和不同土地利用类型进行土壤干容重和土壤含水率的均值统计(表 2 ~ 表 4)。土壤类型和质地代表影响土壤干容重的结构性因素,土地利用类型代表人类活动等随机性因素。

表 2 不同土壤类型的土壤干容重和土壤含水率

Tab.2 Soil bulk density and soil water content for different soil types

土壤类型	样点数量	土壤含水率/%	土壤干容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
水稻土	71	24.38	1.22
石灰土	10	20.34	1.26
红壤土	33	20.75	1.30

表 3 不同土壤质地的土壤干容重和土壤含水率

Tab.3 Soil bulk density and soil water content for different soil textures

土壤类型	样点数量	土壤含水率/%	土壤干容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
轻壤土	51	22.09	1.24
中壤土	42	22.15	1.25
重壤土	15	21.69	1.28
砂壤土	6	21.21	1.33

表 4 不同土地利用类型的土壤干容重和土壤含水率

Tab.4 Soil bulk density and soil water content for different land use types

土地利用类型	样点数量	土壤含水率/%	土壤干容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
菜地	16	24.08	1.23
草地	21	23.53	1.25
黄豆地	11	26.33	1.13
林地	7	18.98	1.34
桑树地	21	20.22	1.32
水稻田	3	29.29	1.15
玉米地	35	23.01	1.23

从土壤类型来看,各土壤类型的土壤干容重有着显著的差异。研究区域的红壤土主要分布在鹤庆坝地势较高的地区,土地利用类型以林地为主,土壤干燥、坚硬,土壤干容重大;水稻土主要分布在鹤庆坝地势较低的地区,主要为耕地,土壤含水率较高,土壤干容重小;研究区域石灰土主要为荒草地,土壤干容重居中。从土壤质地来看,砂壤土由于土壤颗粒大,总的孔隙小,其含水率较低,因而土壤干容重大。轻壤土和中壤土以耕地为主,受耕作、施肥等影响,土壤干容重较小。从土地利用类型来看,林地人类活动干预少,土壤干容重大;黄豆地和水稻田人类活动干预较大,土壤干容重小。虽然土壤干容重由于结构性因素而差别较大,但是由于人类活动等随机因素的影响,土壤干容重趋于均一化。从表 4 中

看出,除了林地和桑树地,其他土地利用类型之间土壤干容重差异很小。

3.3 土壤干容重的空间分布

利用图 3 中的模型和参数进行土壤干容重的 OK 和 OCK 插值,得到研究区域土壤干容重的 OK 和 OCK 插值图(图 4),插值图的栅格大小为 30 m。从 2 幅插值图上可以看出研究区域土壤干容重总的空间分布趋势是一致的,高值区域主要集中在中东部,低值区域主要集中在北部和南部。研究区域土壤干容重最高值为 $1.51\text{ g}/\text{cm}^3$,出现在中东部盆地边缘的林地;土壤干容重最低值为 $0.89\text{ g}/\text{cm}^3$,位于鹤庆坝北部的盆地底部,土地利用类型为玉米田。但在局部区域,2 幅插值图仍有明显的差别。如图形的西北部,OCK 法比 OK 法多了 1 个低值中心,而在南部却少了 1 个低值中心。表 5 比较了土壤干容重实测值和 2 种插值方法预测结果的统计特征,表明 2 种预测方法下,土壤干容重的标准差明显减小,导致预测数据的变异系数减小。可见,2 种预测方法都具有一定的“平滑”效应。

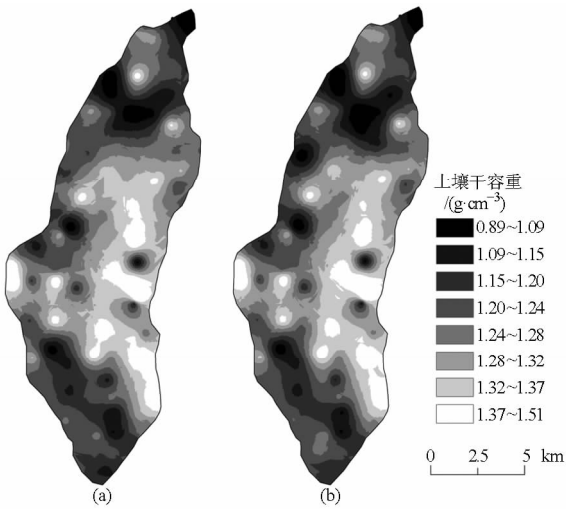


图 4 研究区域 OK 法和 OCK 法预测的土壤干容重空间分布图

Fig.4 Distribution maps of soil bulk density predicted by Kriging and Cokriging
(a) OK 法 (b) OCK 法

3.4 土壤干容重的空间插值精度评价

用 23 个验证采样点的实测值分别对 2 种插值方法进行精度评价(图 5)。

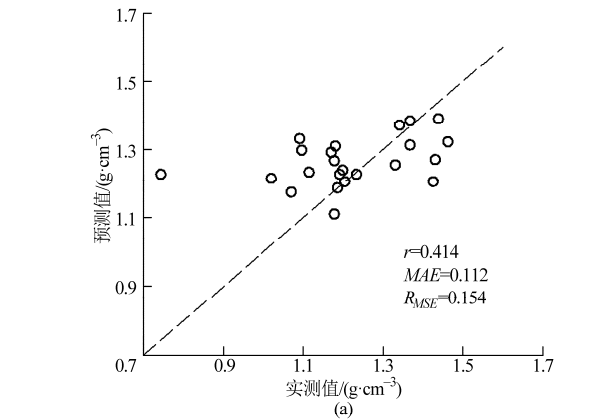
从平均绝对误差(MAE)和均方根误差(R_{MSE})来看,其值都很小,说明 2 种方法都具有较高的插值精度。但是,OCK 插值中的 MAE 和 R_{MSE} 值都比 OK 插值中的 MAE 和 R_{MSE} 值小,说明 OCK 插值精度优于 OK 插值精度。这从预测值和实测值之间的相关系数也可以看出。OK 法相关系数为 0.414,而 OCK 法相关系数达到 0.804。可见加入了协同变量后相

表 5 土壤干容重预测结果比较

Tab.5 Descriptive statistics of soil bulk density for soil samples estimated by Kriging and Cokriging

	实测数据	OK	OCK
样点数目	114	293 408	293 408
最小值/(g·cm ⁻³)	0.744	0.894	0.889
最大值/(g·cm ⁻³)	1.597	1.510	1.509
平均值/(g·cm ⁻³)	1.245	1.257	1.254
标准差/(g·cm ⁻³)	0.154	0.080	0.083
变异系数/%	12.36	6.34	6.59

关系数得到很大提高,说明利用土壤含水率做辅助变量能够提高土壤干容重的预测精度。



为了更直观地比较 OCK 法相对 OK 法的优越性,选用均方根误差(R_{MSE})为指标,以 OK 法为参照方法,评估 OCK 法相对于 OK 法的精度改进值(R_I)^[20]。

$$R_I = \frac{R_{MSEOK} - R_{MSEOCK}}{R_{MSEOK}} \times 100\%$$

(3)

式中 R_{MSEOK} ——OK 法的 R_{MSE} 值
 R_{MSEOCK} ——OCK 法的 R_{MSE} 值

R_I 为正值说明相对于参照方法而言精度得到提高,值越大精度提高越多;相反,如果 R_I 值为负则说明预测精度低于参照方法。OK 法和 OCK 法的精度评价结果如图 5 所示。

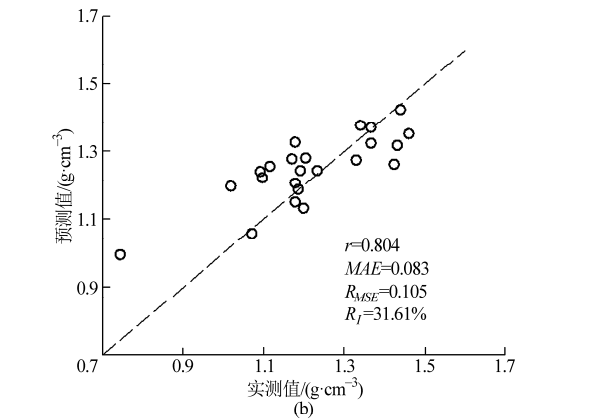


图 5 OK 和 COK 法预测土壤干容重精度比较

Fig.5 Accuracy comparison between measured and predicted soil bulk density by Kriging and Cokriging

(a) OK 法 (b) OCK 法

从 R_I 值来看,相对于 OK 法,OCK 法能够明显地提高土壤干容重的空间预测精度,可提高 31.61%。这与其他研究结果是一致的^[12-13]。土壤干容重的环刀测验工作量大,耗时长。而土壤含水率的测定可以采用 TDR、TDT、FDR 等方法,直接测定土壤含水率,大大地减少野外工作量,缩短野外工作时间。本研究中协同变量的样点数量为 114 个,仅比土壤干容重的建模数据多 23 个,却有效地提高了土壤干容重的预测精度。如能获取空间上连续的土壤水分数据,OCK 法的预测精度将更高。土壤干容重与遥感影像光谱特征的关系成果报道很少,但是土壤含水率遥感反演却已经取得较好的成果^[21-22],保证了土壤含水率面上数据的获取。因

此,利用土壤含水率作为研究区域土壤干容重空间变异分析的协同变量具有很大的潜力。

4 结论

- (1)研究区域土壤干容重具有强烈的空间自相关性,空间格局上表现为东中部高,南北低的趋势,其空间变异主要受到土壤类型和土地利用方式等因素的影响。
- (2)利用克里格法能够有效地获取研究区域土壤干容重的空间分布,但是以土壤含水率为辅助变量进行协同克里格插值能够显著提高土壤干容重的预测精度,提高幅度达到 36.61%。

参 考 文 献

1 潘云,吕殿青. 土壤干容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报,2009, 28(2):59-62.
Pan Yun, Lü Dianqing. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2):59-62. (in Chinese)

2 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤干容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004, 18(3):53-56.
Zhen Jiyong, Shao Ming'an, Zhang Xingchang. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3):53-56. (in Chinese)

- 3 卢修元,魏新平,王君勤. 土壤干容重对溶质迁移过程的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(2):26-29.
Lu Xiuyuan, Wei Xinping, Wang Junqin. Effect of soil bulk density on process of soil solute transport[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2):26-29. (in Chinese)
- 4 张育林,王益权,胡海燕,等. 陕西关中地区农田土壤物理状态初探[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):75-79.
Zhang Yulin, Wang Yiquan, Hu Haiyan, et al. Study on soil micro flora in boundary soil layer of gravel and sand mulched field in arid and semiarid area of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1):75-79. (in Chinese)
- 5 陈翠英,江永真. 土壤养分空间变异性的随机模拟及其应用[J]. 农业机械学报,2006,37(12):67-70.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen. Stochastic simulation of spatial variability of soil nutrient property and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12):67-70. (in Chinese)
- 6 杨奇勇,蒋忠诚,罗为群,等. 岩溶峰丛洼地山体阴影区域植被指数的随机模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(5):232-237.
Yang Qiyong, Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, et al. Sequential simulation of normal different vegetation index of mountain shadow in Karst peak cluster area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):232-237. (in Chinese)
- 7 司涵,张展羽,吕梦醒,等. 小流域土壤氮磷空间变异特征分析[J]. 农业机械学报,2014,45(3):90-96.
Si Han, Zhang Zhanyu, Lü Mengxing, et al. Spatial variability of soil nitrogen and phosphorus in small watershed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3):90-96. (in Chinese)
- 8 Ghadermazi J, Sayyad G, Mohammadi J, et al. Spatial prediction of nitrate concentration in drinking water using pH as auxiliary Cokriging variable[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 3:130-135
- 9 Babak O, Deutsch C V. Improved spatial modeling by merging multiple secondary data for intrinsic collocated Cokriging[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 69(1-2):93-99.
- 10 Wu C, Wu J, Luo Y, et al. Spatial prediction of soil organic matter content using Cokriging with remotely sensed data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4):1202-1208.
- 11 Martinez C A. Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain[J]. Journal of Hydrology, 1996, 174(1-2):19-35.
- 12 Triantafilis J, Odeh I O A, McBratney A B. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3):869-878.
- 13 Yates S R, Warrick A W. Estimating soil water content using Cokriging[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(1):23-30.
- 14 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- 15 Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 2012, 171-172:35-43.
- 16 Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field[M]//Hillel D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980:319-344.
- 17 吕殿青,邵明安,刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(3):154-157.
Lü Dianqing, Shao Ming'an, Liu Chunping. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3):154-157. (in Chinese)
- 18 张川,陈洪松,张伟,等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
Zhang Chuan, Chen Hongsong, Zhang Wei, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6):1585-1591. (in Chinese)
- 19 刘广明,吴亚坤,杨劲松,等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J]. 农业机械学报,2013,44(7):78-82.
Liu Guangming, Wu Yakun, Yang Jinsong, et al. Regional 3-D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):78-82. (in Chinese)
- 20 Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators[J]. Ecological Indicators, 2008, 8(5):485-501.
- 21 Ammarin M, Chang N B, Mark B, et al. Soil moisture estimation in a semiarid watershed using RADARSAT-1 satellite imagery and genetic programming[J]. Water Resources Research, 2006, 42(9):1-15.
- 22 邱扬,傅伯杰,王军,等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,2007,26(1):100-107.
Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1):100-107. (in Chinese)