

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

中国生态学会  
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 33 卷 第 19 期 2013 年 10 月 (半月刊)

## 目次

### 中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 ..... 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 ..... 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 ..... 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 ..... 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 ..... 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 ..... 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 ..... 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 ..... 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 ..... 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 ..... 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 ..... 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究 .....  
..... 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 ..... 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 ..... 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响 .....  
..... 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝怪柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 ..... 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 ..... 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 ..... 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 ..... 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 ..... 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 ..... 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 ..... 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 ..... 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 ..... 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 ..... 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 ..... 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例 .....  
..... 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 ..... 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 ..... 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 ..... 宗 宁, 石培礼, 蒋 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 ..... 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

|                                                       |                         |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| 广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM <sub>2.5</sub> 浓度及水溶性离子特征 ..... | 肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209) |
| 马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局 .....                              | 汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218) |
| 黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化 .....                                | 陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227) |
| 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态 .....                           | 李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)    |
| 笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性 .....                               | 陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246) |
| 海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估 .....                            | 陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254) |
| 中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标 .....                         | 郭子良, 崔国发 (6264)         |
| 生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响 .....                        | 易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277) |
| 华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性 .....                      | 王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287) |
| 中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性 .....                        | 俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295) |
| 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应 .....                        | 盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)    |
| 气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响 .....                              | 贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314) |
| 内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性 .....                           | 朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等 (6320) |
| 黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应 .....                            | 马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328) |
| 成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价 .....                      | 秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335) |
| 大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系 .....                      | 杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345) |
| 夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用 .....                           | 林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354) |
| 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子 .....                              | 石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363) |
| 植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响 .....                     | 王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373) |
| 油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性 .....                               | 孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382) |
| 基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例 .....                 | 文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389) |
| 基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例 .....              | 施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)    |
| 生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析 .....                               | 祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411) |
| “世博”背景下上海经济与环境的耦合演化 .....                             | 倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418) |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 464 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 55 \* 2013-10



**封面图说:** 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

**彩图及图说提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305030916

文雯, 周宝同, 汪亚峰, 黄勇. 基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例. 生态学报, 2013, 33(19): 6389-6397.

Wen W, Zhou B T, Wang Y F, Huang Y. Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6389-6397.

## 基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值 ——以黄土丘陵区小流域为例

文 雯<sup>1,2</sup>, 周宝同<sup>1</sup>, 汪亚峰<sup>2,\*</sup>, 黄 勇<sup>2,3</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

3. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 利用普通克里格法(OK)、反距离加权法(IDW)、径向基函数法(RBF)、基于土地利用类型修正的普通克里格法(OK\_LU) 4 种插值方法, 对黄土丘陵羊圈沟小流域的土壤有机碳含量进行空间插值。预测结果的准确性通过 Pearson 相关系数(R), 平均绝对误差(MAE), 均方根误差(RMSE), 准确度(AC)来评价。研究表明: (1) 在前 3 种常规空间插值方法中, OK 对刻画区域土壤有机碳的空间分布趋势效果最佳, 其预测 MAE 值和 RMSE 值均为最小, Pearson 相关系数(R)和准确度(AC)最大, 说明其预测结果的准确性最好、预测的极端误差也最小; 其次为 RBF; IDW 预测的效果最差。(2) OK\_LU 在空间特征表达方面能够更好地反映复杂地形区的局部变异, 其插值结果的精度相比 OK 有一定程度的提高, 其平均绝对误差(MAE)从 0.900% 降到了 0.567%, 均方根误差(RMSE)从 1.101% 降到了 0.777%, Pearson 相关系数(R)从 0.4026 提高到 0.5589, 准确度(AC)从 0.9081 提高到 0.9505。综合比较, 在黄土丘陵地区, OK\_LU 能使插值结果的精度有较大提高, 是土壤有机碳空间制图的有效途径。

**关键词:** 土壤有机碳; 空间插值; 土地利用类型; 黄土丘陵地区

## Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region

WEN Wen<sup>1,2</sup>, ZHOU Baotong<sup>1</sup>, WANG Yafeng<sup>2,\*</sup>, HUANG Yong<sup>2,3</sup>

1 School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** Maps of regional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) in detail are needed to guide sustainable soil uses and management decisions. Spatial interpolation methods include deterministic methods and geo-statistical methods. Deterministic method is based on mathematical functions, which search for the spatial similarities within a certain geographical area, such as inverse distance weighting method (IDW), or create prediction surface by the known samples based on smoothness such as radial-based function method (RBF); Geo-statistical method is one of the important means for soil mapping supported by geographical and ecological parameters. It can achieve unbiased optimal estimation of regionalized variables by using the statistical property of the known samples, and on the basis of theoretical analysis of semi-variogram, such as ordinary kriging method (OK). Many of these methods perform well in areas with gentle terrains. However it is uncertain how these methods perform to capture SOC variations in complex terrains, especially in those areas where land uses are highly influenced by human activities, such as in the Loess Plateau of China. Therefore, four methods were applied to predict SOC content spatial explicitly at typical small watershed in the Loess Plateau of China including Ordinary Kriging method (OK), Inverse Distance Weighted (IDW) method, Radial-Based Function method (RBF), and Ordinary kriging

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40925003)

收稿日期: 2013-05-03; 修订日期: 2013-07-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfwang@rcees.ac.cn

modified with land-use type method (OK\_LU) in the present research to evaluate their usability.

The purpose of this study is to find appropriate methods which are suitable to the complex terrain in Loess Plateau region of China. The study area was a typical watershed in Loess Plateau with complex hilly gully terrain and various land-use types. A field sampling dataset of 188 points was divided into two parts randomly: 75% for model building and 25% for accuracy validation. The accuracy validation points were used to compare the predicted value with measured value to check the similarity at each point. Prediction results were validated using Pearson's Correlation Coefficient ( $R$ ), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) and Accuracy (AC). The model with higher  $R$  and lower MAE and RMSE, while the AC value is closer to 1 was regarded as more relevant, less biased and more accurate.

Results showed that: (1) The values of MAE and RMSE produced by OK method were the lowest, while the values of  $R$  and AC were the largest, which indicated OK's highest effectiveness in SOC interpolation to yield the most accurate results among the three ordinary methods. IDW method ranked behind OK and followed by RBF method in interpolation effectiveness. (2) OK\_LU was the best method for predicting SOC in this study. The prediction by OK\_LU had more details of depicting the local variation under land-use types. MAE by OK\_LU decreased from 0.900% to 0.567%, RMSE decreased from 1.101% to 0.777%,  $R$  increased from 0.4026 to 0.5589, and AC increased from 0.9081 to 0.9505 comparing with OK. In conclusion, OK\_LU gave more precise evaluation which was critical for obtaining accurate spatial distribution of SOC in Loess Hilly regions. This will be of interests for related research in similar environments.

**Key Words:** soil organic carbon; spatial interpolation; land-use type; Loess Plateau

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,准确估算土壤碳库储量对正确评价土壤在陆地生态系统碳循环、全球碳循环以及全球环境变化中的作用有重要意义<sup>[1-3]</sup>。土壤有机碳是土壤中较为活跃的部分,其含量和动态在土壤质量演变和全球碳循环中起着十分重要的作用,也是估算土壤碳库储量的关键因素<sup>[4-5]</sup>。对土壤有机碳含量的空间差异进行研究,获得区域土壤有机碳含量的连续空间分布,是精准农业技术体系中管理和分析土壤背景数据的一项基础性工作,然而大规模的土壤有机碳空间分布信息的采集需要花费大量的人力、物力和财力。因此,研究如何利用有限的样本数据来获得更为详尽的土壤有机碳空间分布信息的方法具有重要意义。

空间插值模型是实现土壤有机碳含量从离散的点状信息向面状连续信息转换的有力工具,是表征土壤有机碳空间分布特征的重要手段,可以将有限的采样点用来预测整个研究区域的土壤属性空间信息<sup>[6-9]</sup>。空间插值方法包括确定性方法和地理统计方法<sup>[10]</sup>;确定性方法是使用数学函数进行插值,以研究区域内部的相似性(如反距离加权法),或以平滑度为基础(如径向基函数法),由已知样点来创建预测表面的插值方法;地理统计方法是利用已知样点的统计属性,在半变异函数理论分析基础上,对区域化变量的取值实现无偏最优估计的一种方法,如普通克里格法。从学者们的研究中不难发现,普通克里格插值法是使用频率最高的空间预测方法,但在地形复杂的区域,普通克里格方法的应用有一定的局限性<sup>[11]</sup>,因而一些结合地貌类型、土壤类型、土地利用类型和海拔高度等信息的克里格插值模型相继提出,通过辅助信息可以提高目标变量的预测精度<sup>[10-12]</sup>。

土地利用和管理水平是影响土壤有机碳含量最普遍、最直接的因素之一,很大程度上影响着土壤有机碳变化的程度和方向<sup>[13]</sup>,国内外学者已对不同土地利用方式下土壤碳库特征进行了对比分析<sup>[14-16]</sup>。黄土丘陵地区,地形复杂,土地利用类型多样,土地利用类型是土壤有机碳含量空间分布差异的重要影响因素之一,有必要在土壤有机碳的空间插值中考虑土地利用因素。对土壤属性空间预测的插值方法的对比研究很多,然而对于适宜黄土丘陵地形复杂地区插值方法的对比研究还较少,黄土丘陵地区基于土地利用类型修正的土壤有机碳含量空间插值研究更不多见。本研究针对黄土丘陵地区现有的土壤有机碳研究中较少考虑的不同空间插值方法对预测精度的影响、土地利用类型修正对插值方法精度的影响等问题,以羊圈沟流域作为研究区域,分析比较3种常用的普通克里格法(OK)、反距离加权法(IDW)、径向基函数法(RBF),及经过土地利用类型修正的普通克里格法(OK\_LU)进行精度对比分析,揭示了最适宜地形复杂的黄土丘陵沟壑区土壤有机碳空间插值研究的方法,以期类似区域的土壤属性空间分布信息研究提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 流域自然概况

羊圈沟流域位于延安市宝塔区东北方向14 km处,属宝塔区李渠镇辖区,为延河左岸的二级支沟(36°42'N, 109°31'E),该流域属于碾庄沟流域的一级支流。流域内存在一系列早期建造的淤地坝,自1999年流域内实施了退耕还林政策。该区域属黄土丘陵沟壑区第二副区,年太阳总辐射量5800 kJ/cm<sup>2</sup>,年日照时数2528.8 h,一般年份能完全满足小麦、玉米、谷类作物的生长要求。流域植被在区划上属于森林草原过渡带。流域内由于人为活动的干扰,自然植被破坏殆尽,多为人工种植而形成的次生

植被,植物种类主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柳树(*Salix spp.*)和杨树(*Poplar spp.*)等<sup>[17]</sup>。

2011 年羊圈沟流域的八种主要土地利用类型为林地、灌木林地、草地、果园、梯田、坝地、水域和建设用地(表 1)。主要的分布格局为:林地、灌木林地、草地遍布在整个流域;果园分布在流域中部;水域、居住用地和梯田主要分布在流域南部;坝地沿沟分布(图 1)。

### 1.2 样品采集与分析

2011 年分别在延安羊圈沟流域进行了两次野外全流域采样。本研究采用地形剖面线法进行坡面采样,采样时按土地利用类型和土壤断面布设采样点,同时考虑微地貌,每个土壤断面取 3 至 6 个点,取样器为荷兰 Eijkekamp 公司产直径为 6 cm 的半圆凿型土钻。采样深度为 0—20 cm,深度间隔为 0—5 cm,5—10 cm 和 10—20 cm。为体现采样点分布的均匀性,根据各地类所占比例的大小,分地类进行样点的采集,以保证样点在不同土地利用类型中的合理分布,如图 1、表 1 所示。将野外采集的土壤样品带回实验室后,先经过风干、研磨、过筛、称重和装盒等过程后,再进入实验室分析阶段。有机碳含量的测定使用  $K_2Cr_2O_4$  外加热法。

### 1.3 数据处理

在 Mapgis 软件中通过 GPS 将野外均匀布点采集样点的经纬度坐标与羊圈沟流域的空间分布坐标相连接,将测得的数据导入羊圈沟流域的点位表中,添加到土地利用类型图中,得到研究区域采样点的分布图(图 1)。将研究区域内采样点 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 测得的土壤有机碳含量值综合,得到 0—20 cm 土层厚度的土壤有机碳含量值。本研究主要采用 0—20 cm 土层的土壤有机碳含量值作为研究对象。通过对比分析 3 种常用的插值方法与基于土地利用类型修正的方法的预测精度,分析本研究区域的最优插值方法。

#### 1.3.1 插值方法的选择

本研究中土壤有机碳的空间插值的 4 种方法均基于 ArcGIS10.0 中的 ArcMap 平台实现。

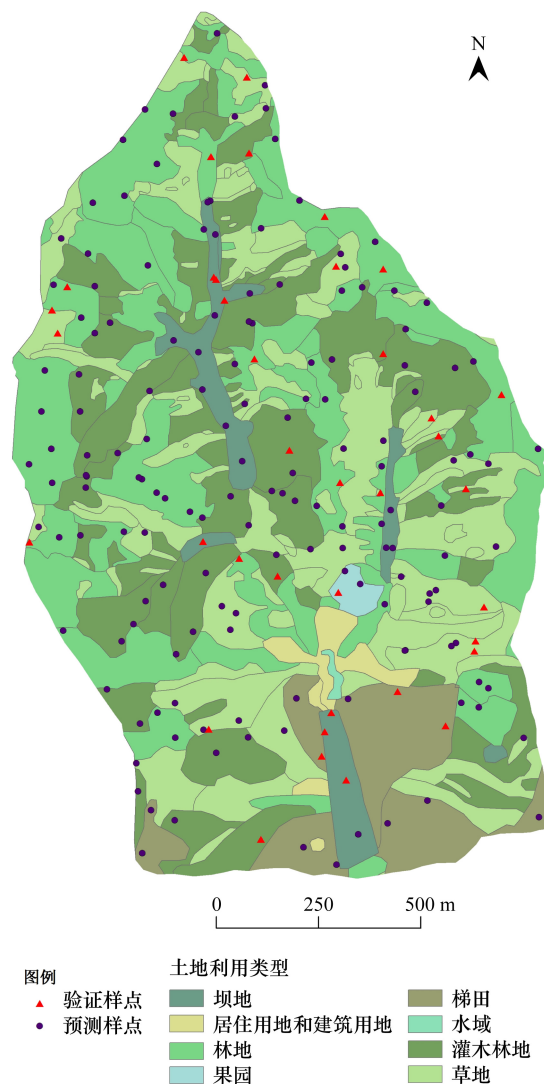


图 1 研究区域样点分布图

Fig.1 Map of sample distribution

表 1 黄土丘陵区羊圈沟流域土地利用面积、采样数及其所占比例

Table 1 Land-use type area, sample size and their proportion in Yangjuangou watershed of hilly region, Loess Plateau

| 土地利用类型<br>Land use type   | 面积/m <sup>2</sup><br>Area | 面积比例/%<br>Area proportion | 样本数<br>Sample number | 样本比例/%<br>Sample proportion |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 草地 Grass land             | 527745.31                 | 25.69                     | 43                   | 22.87                       |
| 灌木林地 Shrub land           | 517662.40                 | 25.20                     | 40                   | 21.28                       |
| 林地 Forest land            | 655663.03                 | 31.92                     | 66                   | 35.11                       |
| 梯田 Terrace land           | 218743.42                 | 10.65                     | 12                   | 6.38                        |
| 果园 Orchard land           | 10263.60                  | 0.50                      | 4                    | 2.13                        |
| 坝地 Dam land               | 88437.12                  | 4.31                      | 23                   | 12.23                       |
| 水域 Water                  | 2677.85                   | 0.13                      | 0                    | 0.00                        |
| 居住和建筑用地 Construction land | 32934.44                  | 1.60                      | 0                    | 0.00                        |
| 合计 Summation              | 2054127.16                | 100.00                    | 188                  | 100.00                      |

(1) 普通克里格法 (Ordinary Kriging, 简称 OK)

普通克里格法是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优

估计的一种方法。使用公式表示为:

$$Z_{(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_{iz}(x_i) \quad (1)$$

式中,  $Z$  为待估计的土壤有机碳含量栅格值,  $n$  为用于插值的采样点数目,  $Z(x_i)$  为采样点土壤有机碳含量值,  $\lambda_i$  为赋予土壤有机碳含量数据的一组权重系数, 并且其和等于 1, 即:  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ , 选取的  $\lambda_i$  使  $Z_{(x_0)}$  的估计无偏, 并且使方差小于任意观测值线性组合的方差<sup>[18]</sup>。

### (2) 逆距离权重法 (Inverse Distance Weighting, 简称 IDW)

逆距离权重法<sup>[19]</sup>是对采样点进行线性的加权来决定输出的栅格值, 加权与距离成反比, 输入点离输出栅格越远, 它对输出栅格的影响越小。使用公式表示为:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p} z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p}} \quad (2)$$

式中,  $Z$  为待估计的土壤有机碳含量值栅格值,  $z(x_i)$  为第  $i(i=1, 2, \dots, n)$  个采样点的土壤有机碳含量值,  $n$  为用于土壤有机碳含量值插值的采样点个数,  $d_i$  为插值点到第  $i$  个采样点的距离,  $p$  为距离的幂。在本文中,  $p$  取为 2, 即反距离平方插值。

### (3) 径向基函数插值

径向基函数插值<sup>[18]</sup>是假设有一个实值函数  $F = F(x)$ , 要逼近其在某些点  $x$  处的函数值。用径向基函数来完成逼近的方法是构造一个具有以下形式的逼近函数  $S(x)$ :

$$S(x) = \sum_{i=1}^N a_i \varphi(\|x - x_i\|), x \in R^d \quad (3)$$

其中,  $\varphi(t)$ ,  $t \geq 0$ , 是一个确定的实值函数, 即径向基函数,  $\|\cdot\|$  表示欧几里得距离,  $a_i, i = 1, \dots, N$  是待定系数。点  $x_i, i = 1, \dots, N$  为径向基函数逼近的节点。相比于其他需要复杂处理的方法, 径向基函数曲面的简单结构使得径向基函数逼近方法更加具有吸引力。

### (2) 结合土地利用类型修正的克里格法 (OK\_LU)

以采样点分布图为底图, 导出样点土壤有机碳含量与土地利用类型的关系数据表, 并利用 SPSS18.0 软件对数据进行统计分析, 分别计算平均值、标准差、变异系数和相关系数, 并利用单因素方差分析中的 LSD 进行多重比较。明确土地利用类型对土壤有机碳含量分布的影响后, 在普通克里格插值方法的基础上, 结合土地利用类型修正的克里格法即结合土地利用类型因子进行修正, 具体分两步进行:

第一步, 先将所有预测点按照土地利用类型分为 6 类, 求出各土地利用类型的平均土壤有机碳含量值。将每一个样本的土壤有机碳含量值  $Z(X_{kj})$  分为相同类型均值  $\mu(T_k)$  和离差  $R(X_{kj})$  之和。用公式表示为:

$$Z(X_{kj}) = \mu(T_k) + R(X_{kj}) \quad (4)$$

式中,  $Z(X_{kj})$  为样品的土壤有机碳含量值;  $\mu(T_k)$  为相同土地利用类型样本的土壤有机碳含量均值;  $R(X_{kj})$  为样本土壤有机碳含量与其相同土地利用类型样品的均值之差, 称为“离差”。研究将离差作为一个新的区域变量  $R(X_{kj})$  进行普通克里格插值, 空间插值利用 ArcGIS10.0 软件中的地统计分析模块完成。

第二步, 将插值过后的离差值图层 A 按土地利用类型的不同, 分别加上其地类 SOC 均值, 得到 SOC 初步预测值图层 B。各待估点的土壤有机碳含量预测值为各土地利用类型均值与离差估计值之和。由此得到研究区域土壤有机碳含量空间插值结果。

### 1.3.2 检验方法

为检验不同插值方法在研究区域的预测精度, 将 188 个实测样本在 Arcgis10.0 地统计工具下的 Subset 中随机构建两个子集, 75% 的样本 ( $N=141$ ) 做预测子集, 25% ( $N=47$ ) 的样本做验证子集 (图 1)。本研究对验证样点的预测值与相同位置的实测值进行相关性分析, 对 SOC 的空间插值结果进行精度检验。用预测子集中的样点进行插值预测, 得到验证子集中样点的 SOC 值, 然后通过计算所有验证样点的预测值和观测值的 Pearson 相关系数 ( $R$ ), 平均绝对误差 (MAE), 均方根误差 (RMSE), 准确度 (AC) 作为检验插值精度的标准, 具体公式如下<sup>[20]</sup>:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left( \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad (5)$$

式中,  $\frac{X_i - \bar{X}}{S_x}$ ,  $\bar{X}, S_x$  分别为标准化变量, 样本均值和样本标准差。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(V_{oi} - V_{pi}) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{oi} - V_{pi})^2} \quad (7)$$

式中,  $V_{oi}$  是验证点土壤有机碳含量的实测值,  $V_{pi}$  是验证点土壤有机碳含量的值,  $n$  是验证点数量。

$$AC = 1 - \frac{nRMSE^2}{PE} \quad (8)$$

其中

$$PE = \sum_{j=1}^n [ |P_i - O| + |O_i - O| ]^2 \quad (9)$$

式中,  $n$  为样本数;  $PE$  为可能的误差变化 (Potential error variance),  $P_i$  和  $O_i$  分别为观测值和预测值;  $O$  为实测值的平均值。  $AC$  取值范围为 0 到 1, 1 代表预测值和实测值完全一致, 而 0 代表预测值和实测值完全不同。

## 2 研究结果

### 2.1 描述性统计分析

由表 2 可知, 羊圈沟流域各土地利用类型中土壤有机碳含量平均值的顺序为草地 > 灌木林地 > 林地 > 坝地 > 果园 > 梯田。不同的土地利用方式下, 土壤有机碳含量值存在显著性差异, 在探究土壤有机碳含量信息时, 有必要考虑土地利用类型为辅助因子, 分地类进行插值。

表 2 不同土地利用方式下土壤有机碳含量状况

Table 2 Soil organic carbon content in different land-use type

| 土地利用类型<br>Land-use type | 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content/(g/kg) |                           |                      |                      |
|-------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|                         | 平均值<br>Average value                       | 标准差<br>Standard deviation | 最小值<br>Minimum value | 最大值<br>Maximum value |
| 草地                      | 4.90 A                                     | 1.27                      | 2.46                 | 9.19                 |
| 灌木林地                    | 4.89 AC                                    | 1.48                      | 2.27                 | 8.76                 |
| 林地                      | 4.87 AC                                    | 1.38                      | 2.92                 | 9.12                 |
| 坝地                      | 4.32 B                                     | 1.10                      | 2.34                 | 6.39                 |
| 果园                      | 4.16 C                                     | 1.01                      | 3.31                 | 5.56                 |
| 梯田                      | 3.34 C                                     | 1.16                      | 2.48                 | 4.48                 |
| 总和                      | 4.73                                       | 1.33                      | 2.27                 | 9.19                 |

右上角大写字母表示平均值差异的显著性水平为 0.05 (显著相关)

### 2.2 SOC 空间结构分析

空间自相关理论是地理统计插值法进行预测的理论基础<sup>[21]</sup>, 所谓空间自相关是指在一定区域单元上, 某种地理现象或某一属性值与邻近区域单元上同一现象或属性值的相关性, 它用于衡量空间变量的变异对邻近区域相同变量的变异的依赖程度<sup>[22-23]</sup>, 半变异函数是地统计学中研究土壤变异性的关键函数, 是用来描述土壤性质的空间连续变异的一个连续函数, 反映土壤性质的不同距离观测值之间的变化。存在空间依赖性的数据点对, 距离越近, 其值越相近; 反之越远, 其值越不同<sup>[24]</sup>。半变异函数中,  $N$  表示其块金值,  $S$  表示基台值, 本文应用  $N/S$  和  $S/(N+S)$  量化原始的 SOC 数据 (应用于 OK) 及 SOC 离差数据 (应用于 OK\_LU) 的空间结构强度。  $N/S$  比值按空间结构强度的大小分为三类 ( $N/S > 0.6$ ,  $0.3 < N/S < 0.6$ ,  $N/S < 0.6$ );  $N/S < 30\%$ , 表示强烈的空间相关性;  $0.3 < N/S < 0.6$ , 表示空间相关性较温和;  $N/S > 0.6$ , 表示较弱空间相关性<sup>[25]</sup>。  $S/(N+S)$  比率越接近于 1, 显示其具有越强的空间相关性, 反之, 比率越接近于 0 显示其空间相关性越弱<sup>[26]</sup>。OK 和 OK\_LU 的半变异函数模型如图 2 所示。

### 2.3 插值结果的验证与分析

图 3 中别为运用 OK、IDW、RBF 和 OK\_LU 插值法得到的羊圈沟流域 SOC 空间分布图。从整体上看, 四图均反映出在流域的西北部 SOC 含量较高, 流域南部含量低。然而, 各插值方法的结果图在局部上存在很大差异。由图 3 可以看出, OK 的预测值较连续, 有机碳含量值分布很均匀, 但是没有体现出不同土地利用类型的差异; 图 3 中, IDW 和 RBF 插值的结果图出现了“牛眼”现象, 这是由于样点空间分布不均匀导致的<sup>[10]</sup>, 反距离权重法的插值表面不平滑, “牛眼”现象较为严重; 样条函数法的插值牛眼现象较反距离权重法有所减轻, 但表面仍不光滑; 结合图 3 和图 2 的 2011 年羊圈沟流域的土地利用现状图可以发现, OK\_LU 插值表面比较连续、光滑, 在林地、灌木林地和草地地区体现了较高的土壤有机碳含量值, 而在梯田、坝地、裸地表现出的土壤有机碳含量值较低, 更详细具体地体现了不同土地利用方式对于土壤有机碳空间分布的影响, 对于流域尺度的土壤有机碳的空间变化, 是一种比较理想的插值方法。

如表 3 所示, SOC 的  $N/S$  比值 (0.666) 大于 0.6, OK\_LU 离差的  $N/S$  比值 (0.485) 在 0.3—0.6 之间, SOC 离差的  $S/(N+S)$  值

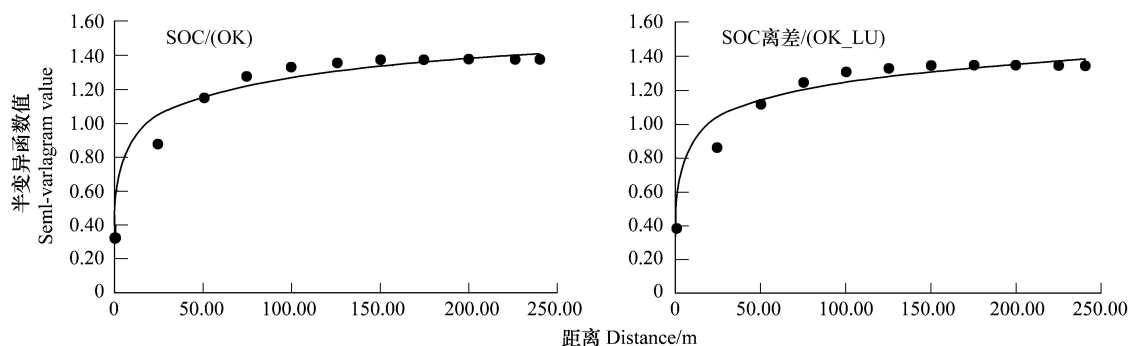


图2 黄土丘陵区羊圈沟流域土壤有机碳空间插值半变异函数图

Fig.2 Semi-variogram map of spatial interpolation of SOC in YangJuanGou watershed of hilly region, Loess Plateau

(0.8175)大于SOC的 $S/(N+S)$ 值(0.7997),即SOC和SOC离差均具有较强的空间相关性,其中SOC离差的空间相关性更强,表明OK和OK\_LU两种插值方法在此研究区域内较为适宜。

表3 半变异函数模型

Table 3 Semi-variogram models

| 参数 Parameter       | 土壤有机碳含量 Soil organic carbon | OK_LU 离差 Residue of OK_LU |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 模型 Model           | 指数模型 Exponential            | 指数模型 Exponential          |
| 步长值 Range/km       | 100                         | 100                       |
| 块金值 $N/(km/m^2)^2$ | 0.1551                      | 0.3104                    |
| 基台值 $S/(km/m^2)^2$ | 0.6191                      | 1.3901                    |
| $N/S$              | 0.2505                      | 0.2233                    |
| $S/(N+S)$          | 0.7997                      | 0.8175                    |

从表4可以看出,4种方法的实测值与预测值均具有一定的相关性,IDW的 $R=0.3146$ ( $P=0.0397$ )和RBF的 $R=0.3012$ ( $P=0.0385$ )是显著相关;OK的 $R=0.4026$ ( $P=0.0050$ )和OK\_LU的 $R=0.5589$ ( $P=0.0000$ )是极显著相关。同时,通过均方根误差(MAE)、平均绝对误差(RSME)和准确度(AC)来衡量4种预测方法的系统误差及预测结果的准确性。OK\_LU平均绝对误差和均方根误差(MAE=0.7930,RSME=0.2136)均小于OK(MAE=0.8665,RSME=0.2927)、IDW(MAE=0.8665,RSME=0.2927)、RBF(MAE=0.8665,RSME=0.2927);而OK\_LU( $R=0.5589$ ,AC=0.9505)相关性和准确度均高于OK( $R=0.4026$ ,AC=0.9081)、IDW( $R=0.3146$ ,AC=0.0397)、RBF( $R=0.3012$ ,AC=0.0385)。可以看出,在对土壤有机碳进行空间插值时(特别是在黄土丘陵沟壑地区)结合土地利用类型,能使插值结果的精度得到很大的提高,是获得精确的土壤有机碳空间分布图是关键因素。

表4 验证样点实测值与估算值相关性检验

Table 4 The correlation test of the measured value and the estimated value

|                                     | 普通克里格法<br>OK | 反距离插值法<br>IDW | 径向基函数法<br>RBF | 基于土地利用类型修正的<br>普通克里格法<br>OK_LU |
|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| 相关性 Correlation                     | 0.4026       | 0.3146        | 0.3012        | 0.5589                         |
| 显著性 Significance                    | 0.0050 **    | 0.0397 *      | 0.0385 *      | 0.0000 **                      |
| 平均绝对误差 Mean Absolute Error (MAE)    | 0.8665       | 0.8778        | 0.8707        | 0.7930                         |
| 均方根误差 Root Mean Square Error (RMSE) | 0.2927       | 0.3265        | 0.3109        | 0.2136                         |
| 准确度 Accuracy (AC)                   | 0.9081       | 0.8577        | 0.8647        | 0.9505                         |

\* 表示相关显著性水平为0.05;\*\*表示相关显著性水平为0.01

### 3 讨论

#### 3.1 OK\_LU的优越性

地统计法在地形变化不十分剧烈、比较平坦的平原地区可以得到较好的探测和模拟,其不仅考虑了待预测点与邻近样点数据间的空间距离关系,还考虑了各参与预测的样点间的位置关系,充分利用了各样点数据的空间分布结构特征,地理统计方法的这种优越性对于常常出现样本不充分、采点未经优化等问题的土壤属性数据的空间插值来说尤为重要<sup>[22]</sup>。本研究区的土壤

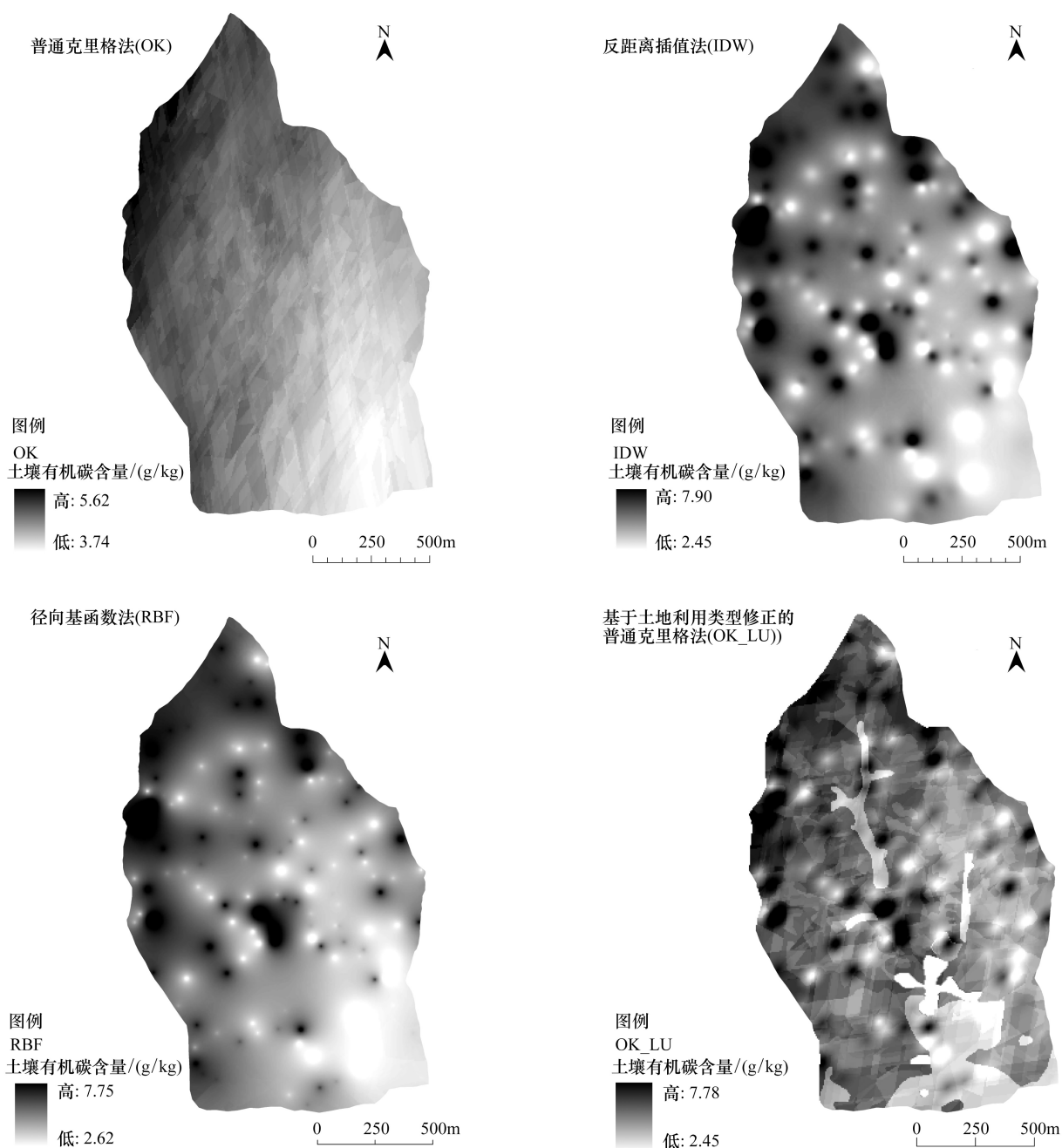


图3 黄土丘陵区羊圈沟流域土壤有机碳空间分布图

Fig.3 Distribution of SOC in Yangjuangou watershed of hilly region, Loess Plateau

有机碳数据来自随机采样,OK 使其插值结果比 IDW、RBF 等传统方法更精确,更有效避免了系统误差的出现。

然而在黄土丘陵沟壑区,OK 的应用却有一定的局限性<sup>[10]</sup>。由本文分析可知,在研究区内土地利用类型是影响 SOC 空间分布差异的重要因素,因此结合土地利用类型对 SOC 空间插值修正是非常必要的。该区地形破碎、土地利用类型多样,基于半变异函数的克里格插值难以将复杂的地形参数用于研究 SOC 空间变化。本文通过对普通克里格插值方法进行土地利用类型修正,在黄土丘陵沟壑区对 SOC 空间格局的模拟得到了较好效果。范胜龙<sup>[11]</sup>等以福建省龙海市为例,设计了结合地貌类型、土壤类型和土地利用类型等信息的克里格插值模型,结果表明设计的插值模型预测精度均高于普通克里格法,进一步验证了 OK\_LU 的优越性。

### 3.2 土壤属性数据插值方法的选择

由于受到采样点密度、地表的复杂程度等影响,不同的插值方法生成的结果可能大相径庭<sup>[22]</sup>,没有任何一种插值方法适合所有地区,应依据对数据的定性分析、对研究区的地形分析,及对数据的空间探索分析,经过反复实验,选择最优的空间插值

方法<sup>[26-27]</sup>。

若研究目的仅在于对研究区域内几个粗略划分的亚区进行比较,如对黄土丘陵区最高值和最低值的区域进行大致定位,则此时较小尺度的空间变异可以被忽略,只需把握住整体特征和全局趋势,以实施一系列插值优化措施为前提,本研究选用的4种方法均可符合要求。若SOC数据样点密度足够大、研究区域的地形变化不大时,可以直接采用OK进行插值,插值方法简便快捷,预测结果准确性较高;但使用OK插值相对其他地统计方法,步骤繁多,参数设置要求较高,耗时耗力,在研究目的许可的情况下,简单、灵活的IDW、RBF也是合适的选择。如需利用插值结果进行更细致,更高级的空间分析,如图形叠加、构建生态系统模型等,而数据具有某种变化趋势,则必须选择插值精度最高、在小空间尺度表现最好的插值方法,可以考虑将某种因素对克里格插值进行修正,剔除趋势再进行预测<sup>[28]</sup>,如本研究中的OK\_LU,因为误差会发生上行传递和放大,造成更深远的影响。

#### 4 结论

在不同研究区域应根据不同研究目的选择不同的插值方法,不同插值方法各有利弊。当常规方法不能满足预测精度时,可通过辅助信息提高目标变量的预测精度。在本研究区内,普通克里格法是3种常规方法中插值效果最好的方法,径向基函数法一般,反距离权重法插值效果最差。黄土丘陵沟壑区生态环境脆弱,地形较复杂,土地利用类型多样,不同土地利用类型的土壤有机碳含量平均值差异明显,基于土地利用类型修正的普通克里格插值法对SOC含量空间分布的预测精度有一定程度的提高,是地形复杂的黄土丘陵沟壑区土壤有机碳空间插值较适宜的方法。

#### References:

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, De Angelis D L. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [4] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [5] Lal R, Kimble J, Levine E, Whitman C. World soils and greenhouse effect: an overview // Lal R, Kimble J, Levine E, Stewart B A, eds. *Soils and Global Changes*. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995: 1-25.
- [6] Hu K L, Li B G, Lin Q M, Li G T, Chen D L. Spatial variability of soil nutrient in wheat field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(3): 33-38.
- [7] Wang J, Qiu Y. Review on spatial variability and scale effects of land quality. *Progress in Geography*, 2005, 24(4): 28-35.
- [8] Zhang S J, Fang H, He Y. Sampling strategies of field information on precision agriculture. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(4): 88-92.
- [9] Sauer T J, Meek D W. The spatial variation of plant-available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 826-836.
- [10] Yao X L, Fu B J, Lü Y H, Wang S, Liu M. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. *PLoS One*, 2013, 1(8): 1-13.
- [11] Zhang T C, Chang Q R, Liu J. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrient elements — A case study of Yuyang County, Shaanxi Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 177-182.
- [12] Liu X N, Huang F, Wang P. *Principles and Methods of GIS Spatial Analysis*. Beijing: Science Press, 2008: 185-223.
- [13] Liu J, Cai G X, Liu H B. Research of the interpolation methods for determining soil organic matter content in the hilly regions of southwestern China. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2008, 30(3): 107-112.
- [14] Fan S L, Huang Y H, Lin J S. The optimized interpolation models and its relationship with soil sampling density on detecting spatial variability of farmland soil organic carbon — A case study in Longhai city, Fujian province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(6): 1-5.
- [15] Allmaras R R, Schomberg H H, Douglas C L, Dao T H Jr. Soil organic carbon sequestration potential of adopting conservation tillage in U.S. croplands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(3): 365-373.
- [16] Chen J Y, Sun B, Li Z P, Li H Y, Pan J J. Pool size of soil organic carbon and dynamics under different land use. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 91-95, 179-179.
- [17] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, Lü Y H, Luo C Y. Effects of land use change on soil erosion intensity in small watershed of Loess Hilly Region: A quantitative evaluation with 137-Cesium tracer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [18] Fang X, Xu G L, Hong Y, Jing W F. Study on soil organic carbon density under different land use types in central hilly area of Hu'nan province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 54-58, 63-63.
- [19] Zhu H Y, Liu S L, Jia S F. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements. *Geographical Research*, 2004, 23(4): 425-432.
- [20] Yang L, Zhu A X, Qin C Z, Li B L, Pei T, Liu B Y. Soil property mapping using fuzzy membership — A case study of a study area in Heshan farm of Heilongjiang province. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 9-15.
- [21] Lin L, Li C H, Dai M, Cai W G, Lin Q. Optimization of the spatial interpolation for marine phytoplankton abundance. *Acta Ecologica Sinica*,

2007, 27(7): 2880-2888.

- [22] Gringarten E, Deutsch C V. Teacher's aide variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*, 2001, 33(4): 507-534.
- [23] Li X, Cheng G D, Lu L. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang plateau. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(6): 565-573.
- [24] Leenaers H, Okx J P, Burrough P A. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. *Catena*, 1990, 17(6): 535-550.
- [25] Cambardella C A, Karlen D L. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, 1999, 1(1): 5-14.
- [26] Lam N S N. Spatial interpolation methods: A review. *American Cartographer*, 1983, 10(2): 129-149.
- [27] Liu J S, Chen H, Yang B Y, Wang W, Xiang Y, Zhao C. Comparison of interpolation methods on annual mean precipitation in Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [28] Lado L R, Polya D, Winkel L, Berg M, Hegan A. Modelling arsenic hazard in Cambodia: A geostatistical approach using ancillary data. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(11): 3010-3018.

#### 参考文献:

- [6] 胡克林, 李保国, 林启美, 李贵桐, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征. *农业工程学报*, 1999, 15(3): 33-38.
- [7] 王军, 邱扬. 土地质量的空间变异与尺度效应研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 28-35.
- [8] 张淑娟, 方慧, 何勇. 精细农业田间信息采样策略. *农业机械学报*, 2004, 35(4): 88-92.
- [11] 张铁婵, 常庆瑞, 刘京. 土壤养分元素空间分布不同插值方法研究——以榆林市榆阳区为例. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 177-182.
- [12] 刘湘南, 黄方, 王平. GIS 空间分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2008: 185-223.
- [13] 刘静, 蔡国学, 刘洪斌. 西南丘陵地区土壤有机质含量的空间插值法研究. *西南大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(3): 107-112.
- [14] 范胜龙, 黄炎和, 林金石. 表征土壤有机碳区域分布的优化空间插值模型研究——以福建省龙海市为例. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 1-5.
- [16] 陈锦盈, 孙波, 李忠佩, 李海鹰, 潘剑君. 不同土地利用类型土壤有机碳各库大小及分解动态. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 91-95, 179-179.
- [17] 汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 罗春燕. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于  $^{137}\text{Cs}$  示踪的定量评价. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [18] 方晰, 徐桂林, 洪瑜, 金文芬. 湘中丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳密度. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 54-58, 63-63.
- [19] 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题. *地理研究*, 2004, 23(4): 425-432.
- [20] 杨琳, 朱阿兴, 秦承志, 李宝林, 裴韬, 刘宝元. 运用模糊隶属度进行土壤属性制图的研究——以黑龙江鹤山农场研究区为例. *土壤学报*, 2009, 46(1): 9-15.
- [21] 林琳, 李纯厚, 戴明, 蔡文贵, 林钦. 海洋浮游植物丰度的空间插值优化. *生态学报*, 2007, 27(7): 2880-2888.
- [23] 李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较. *高原气象*, 2003, 22(6): 565-573.
- [27] 刘劲松, 陈辉, 杨彬云, 王卫, 相云, 赵超. 河北省年均降水量插值方法比较. *生态学报*, 2009, 29(7): 3493-3500.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| A review of ecosystem services and research perspectives .....                                                                                                                                  | MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)               |
| Sexual interference in non-human primates .....                                                                                                                                                 | YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)             |
| Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review .....                                                                                                                             | HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)                       |
| Proximate and ultimate determinants of food chain length .....                                                                                                                                  | WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)                         |
| Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi .....                                                                                                      | LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)            |
| Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen .....                                                                                                           | XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006) |
| Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve .....                                                                                                                | ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)             |
| Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant ( <i>Syrnaticus reevesii</i> ) using infrared camera .....                                                                | ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)               |
| The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration .....                                                                                            | YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)            |
| Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve .....                                                                                             | LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)                |
| Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China .....                                              | LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)         |
| The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i> .....                                       | WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)              |
| The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i> .....                                                                                         | CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)               |
| Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress .....                                                                                | WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)              |
| Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings .....                                                                | YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)              |
| The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area .....                                           | MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)             |
| Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells ..... | WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)           |
| Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants .....                                                                    | TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)                 |
| Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages .....                                                   | YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)             |
| Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta .....                                                                          | PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)               |
| Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings .....                                                                             | SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)                |
| Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity .....                                      | ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)            |
| Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO <sub>2</sub> .....                                                                                          | SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)                    |
| Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i> .....                                                                                        | MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)           |
| Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i> .....                                                                                                             | ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)                  |
| Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation .....                                                                        | LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)           |
| Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi .....                                                                             | QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)          |
| Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China .....                                                               | YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)              |
| Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River .....                                                           | HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)                 |
| Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau .....                                           | ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)                  |

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain ..... YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM<sub>2.5</sub> and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season ..... XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure ..... WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea ..... CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests ..... LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou ..... CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services ..... CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system ..... GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed ..... YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China ..... WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China ..... E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst ..... SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China ..... HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ..... ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River ..... MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk ..... QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean ..... YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 ..... LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago ..... SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China ..... WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers ..... MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region ..... WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network ..... SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones ..... QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai ..... NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 陈利顶

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 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                       |
| 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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>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 90.00 元