

# 低丘红壤区小流域土壤肥力性质空间分布特征

唐家良<sup>1</sup>, 张斌<sup>1\*</sup>, 王明珠<sup>1</sup>, Alexander Thimm<sup>2</sup>, Harald Zepp<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 德国鲁尔大学地理系, 波鸿 44780)

**摘要:** 利用 GIS 软件的空间分析功能, 以土地利用类型区为分析单元, 分析评价了亚热带典型小流域土壤肥力性质的空间和剖面分布特征。研究表明: 小流域土壤酸化明显, 旱地酸度高于水田; 土壤保肥力处于中等水平以上; 42.6% 的土壤表层有机质处于中度缺乏状态; 94.3% 的表层土壤全 P 和 97.3% 的土壤全 K 处于中度缺乏状态。不同土地利用方式下土壤性质分异明显, 综合评价结果表明水田肥力高于旱地。

**关键词:** 小流域; 土壤肥力; 土地利用; GIS; 空间分布; 评价

**中图分类号:** S158.3; F303.4

南方低丘红壤主要分布于长江中下游以南、南岭以北、武夷山以西、雪峰山以东, 面积为 27.2 万 km<sup>2</sup>, 约占我国红壤面积的 28%<sup>[1]</sup>。研究区内丘岗起伏交叉, 土地利用类型多样, 构成了面积大小不等的农业集水区域 (流域), 土地利用以单一“沟谷农业”模式为基本特征<sup>[2]</sup>。小流域既是开发和治理水土资源的基本单元, 也是研究农业生态的基本单元。土地利用方式在很大程度上决定着土壤养分平衡状况和土壤养分变化趋向<sup>[3-5]</sup>。因此土壤质量的描述和评价常按照土地利用类型来划分<sup>[6]</sup>。近年来, 引入地理信息系统 (GIS) 在很大程度上提高了土壤与生态研究领域的空间范畴<sup>[7-8]</sup>。较大区域尺度的研究缺乏考虑基本景观单元, 如流域中土地利用结构特征对土壤质量的影响<sup>[9-12]</sup>。在一些小尺度研究中<sup>[12-14]</sup>, 对不同土地利用类型区采取整体分析的方法, 缺乏对同一土地利用类型区的密集采样与分析研究, 从而忽略了同一种土地利用单元内的土壤性质空间变异。空间变异研究中, 常采用 Kriging 法<sup>[13-15]</sup>或 IDW (距离反比法)<sup>[16-22]</sup>方法进行插值分析, 从而获知空间分布信息。针对环境条件相对一致的小尺度研究区域, IDW 方法被认为是一种准确可行的空间分析方法<sup>[23-25]</sup>。

本研究基于 ArcGIS 技术和 IDW 插值法, 以小流域内不同土地利用类型区为分析单元分析评价红壤小流域内土壤肥力性质的空间和剖面分布特征,

旨在揭示我国红壤低丘区小流域尺度内土地利用方式对土壤肥力性质的影响机制, 并为该区域农田土壤管理提供基本信息。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 小流域概况

研究区地处江西省鹰潭市余江县刘家站垦殖农场三分场孙家 (116°55'E, 28°15'N) (图 1), 简称孙家小流域。气候温暖湿润, 1954—2003 年年均降水量 1786.1 mm, 年均温 17.7 °C。小流域面积 46 hm<sup>2</sup>, 海拔 41~55 m, 坡度 3°~8°, 其地貌、土壤类型及其成土母质、土地利用方式在当地颇具代表性 (图 1)。

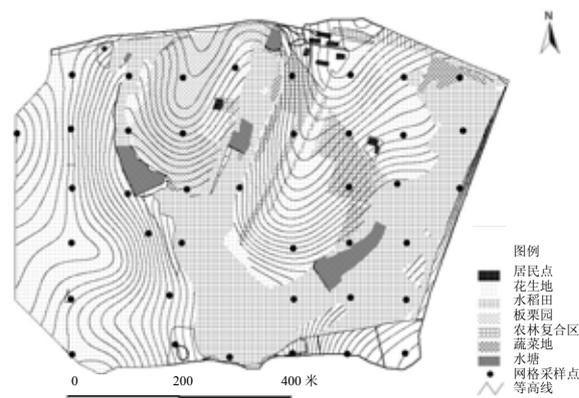


图 1 孙家小流域地形图与土地利用方式

Fig. 1 Relief and landuse of Sunjia catchment

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40071044)、德国科学基金会项目(ZE 254/4)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-5)资助。

\* 通讯作者 (bzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 唐家良(1975—), 男, 四川隆昌人, 博士研究生, 主要从事土壤保持与小流域水文研究。

### 1.2 采样和分析

2000 年在小流域内采用网格法 (100 m × 100 m) 进行样点剖面调查 (图 1)，剖面样点分布于不同土地利用单元内，总数为 41 个。剖面调查深度为 0~100 cm (水田) 或 150 cm (旱地)，调查目的是进行土壤分类。采集剖面土壤表层 (0~20 cm) 和 B 层 (40~80 cm) 土样，进行土壤肥力性质指标测定。测定方法参照文献[26]：土壤质地为吸管法、pH 为电位法 (土水比 1:2.5)、阳离子交换量 (CEC) 为乙酸铵法、有机质为重铬酸钾氧化-外加热法、全 P 为氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法、全 K 为氢氟酸-高氯酸消煮-火焰光度法。

### 1.3 土壤性质空间分析与评价

为了评价不同土地利用方式下土壤性质空间分布特征，将小流域分为 4 类土地利用类型区 (图 1)：花生旱作类型区 (花生地、农林复合地，还包括居民点附近的蔬菜地)，采样点 25 个；水田类型区，采样点为 12 个；果园类型区 (板栗园和居民点附近区域)，采样点为 4 个；水塘没有设置采样点，仅将其作为空白值列入结果图中。在 ArcGIS 8.3 支持下，建立孙家小流域土壤信息库。

本研究在 ArcGIS 中的 Spatial Analyst 模块的支持下，采用在众多研究中广泛应用的 IDW<sup>[16-25]</sup>，分别对不同土地利用类型区进行插值，从而在一定程度上避免了小流域空间相关性的影响。IDW 计算公式<sup>[16, 18-19]</sup>如下：

$$f(x, y) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N w(d)_i z_i}{\sum_{i=1}^N w(d)_i} \right] \quad (1)$$

式中  $f(x, y)$  是插值点  $(x, y)$  的估计值； $d_i$  是点  $i$  到估计点的距离； $z_i$  是  $i$  点的观测值； $w(d)_i$  是权重函数，离估计点近的观测点较距离远的观测点对估计点的影响更大。本文进行内插时考虑临近的 12 个点的综

合影响，即  $N$  值为 12，采用逆距离平方作为权重函数 (公式 2)。

$$w(d)_i = d_{x,y,i}^{-2} \quad (2)$$

在此方法中，只要  $w(d)_i > 0$ ，任何估计点的内插值  $f(x, y)$  均满足以下条件， $\min(Z_i) \leq f(x, y) \leq \max(Z_i)$ <sup>[16]</sup>，从而确保插值面不会出现错误的峰值或谷底值<sup>[20]</sup>。此外，这种方法简洁、计算速度快、插值可信度高，在数据处理中得到了广泛的应用<sup>[16]</sup>。

为了评价红壤小流域的土壤肥力，本文参照鲁如坤、孙波等<sup>[3, 9, 27-28]</sup>的研究成果，建立土壤肥力性质评价标准 (表 1)。在对小流域不同土地利用类型区的土壤肥力性质指标进行插值计算后，基于以上分级评价标准，利用 ArcMap 的空间分析模块作出小流域土壤肥力评价分值分布图，并进行分类面积统计。在进行小流域土壤综合肥力评价时，步骤如下：

(1) 利用 GIS 软件的栅格分析功能，将各土地利用类型区的主题评价分值加和，计算出小流域内每个栅格的土壤综合肥力分值。

(2) 综合肥力评价等级划定以至少代表一半主题评价分值为原则<sup>[23]</sup>，建立新的土壤综合肥力评价标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤肥力性质统计特征

小流域土壤黏粒含量平均值为 325.3 g/kg (表 2)，变异幅度中等，可知小流域土壤质地较有利于耕作。土壤 pH 平均值为 5.25，变异较小，呈现明显的酸性。CEC 平均值 >20 cmol/kg，可知小流域土壤具有中等保肥力<sup>[27]</sup>。土壤有机质含量较低，空间变异最大 (47.18%)。由于小流域为单一的农业利用区域，随机性因素影响不大，因此土壤有机质的空间变异主要受土壤类型和土地利用类型的影响。土壤全 P 和全 K 含量低，其空间变异也较大。

表 1 小流域土壤肥力性质分级评价标准

Table 1 Criteria for grading of soil fertility in Sunjia catchment

评价 分值	有机质 (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	黏粒 (g/kg)
1	<10 (<15)	<0.2	<4	4.5 ~ 5.0	<10	<20
2	10 ~ 15 (15 ~ 22.5)	0.2 ~ 0.6	4 ~ 10	5.0 ~ 5.5	10 ~ 20	20 ~ 300
3	15 ~ 20 (22.5 ~ 30)	0.6 ~ 1.0	10 ~ 20	5.5 ~ 6.0	20 ~ 30	300 ~ 400
4	>20 (>30)	>1.0	>20	>6.0	>30	>400

注：1, 2, 3, 4 分别表征土壤养分贮量 (有机质、全 P、全 K) 严重缺乏、中度缺乏、轻度缺乏、肥沃程度<sup>[3]</sup>；括号内为水田有机质评价标准，其余标准旱地和水田一致。

表 2 小流域表层土壤性质统计特征

Table 2 Statistics of properties of surface soil in Sunjia catchment

项目	样本数	平均	中值	最小值	最大值	变异系数(%)	偏度	峰度
黏粒 (g/kg)	41	325.3	325.0	188.0	477.0	222.9	0.00	2.48
pH	41	5.25	5.20	4.66	6.02	6.23	0.42	2.56
CEC (cmol/kg)	41	22.97	25.28	11.92	30.84	19.50	-0.35	3.19
有机质 (g/kg)	41	14.89	12.72	2.10	33.60	47.18	0.81	3.69
P (g/kg)	41	0.40	0.39	0.11	0.92	34.36	1.13	6.83
K (g/kg)	41	5.88	5.73	2.89	10.18	25.46	0.40	3.52

## 2.2 不同土地利用方式下土壤剖面肥力性质差异

不同土地利用方式下土壤剖面性质分析结果(表 3)表明,果园(板栗园)表层和 B 层土壤黏粒含量显著低于花生地和水田,后两者间没有显著差异,这与果园多为砂质土壤有关。小流域各土地利用方式下 B 层土壤黏粒均高于表层,由于水田表面水平且有田埂保护,其土壤黏粒含量的剖面差异也较大,表明小流域土壤黏粒除了随地表径流迁移外,也可能向下淋溶淀积。水田土壤表层和 B 层的 pH 值均显著高于花生地,这与水田特殊的还原环境有关<sup>[29]</sup>,可能也与该区域中性灌溉水(pH 值约 6.9)的浸泡作用改变稻田土壤的 pH 值有关。旱地土壤 B 层酸度高于表层,说明尽管红壤盐基离子淋溶作用强,施用 Ca、Mg 肥仍能在一定程度上缓冲表层土壤酸化程度。土壤两个层次间 CEC 差异不大。除果园土壤 B 层的 CEC 稍高外,CEC 在不同土地利用

方式间无显著差异,可知流域内土壤均质发育。

水田土壤表层有机质显著高于旱地土壤(表 3),分别高出花生地 60.4% 和果园地 59.0%,这表明秸秆还田、种植绿肥等措施明显提高了水田土壤表层的有机质含量;由于果园板栗等种植时间不长,因此其对土壤表层有机质影响不显著。不同土地利用方式之间土壤表层全 P 含量无显著差异,仅果园土壤 B 层全 P 含量较低。由于当地多在土壤表层施用化肥,因此尽管存在明显的养分淋溶<sup>[3]</sup>,但也使小流域土壤表层的有机质、全 P 含量明显高于土壤 B 层。对土壤表层 K 素而言,花生地高于水田,果园最低。说明水田土壤 K 素消耗量比旱地更大<sup>[30]</sup>;而果园土壤属第三纪红砂岩发育红壤,含 K 矿物含量低<sup>[31]</sup>。旱地土壤表层 K 含量显著低于土壤 B 层,说明孙家小流域旱地土壤表层 K 消耗量大于 K 肥施用量或存在 K 素的向下淋溶<sup>[3]</sup>。

表 3 小流域不同土地利用方式下的土壤剖面性质

Table 3 Properties of soil profiles under different land uses in the catchment

土层	土地利用方式	样品数	黏粒 (g/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	有机质 (g/kg)	全 P (g/kg)	K (g/kg)
表层	花生地	25	338.6 a	5.15 b	22.09 a	12.61 b	0.40 a	6.28 a
	果园	4	199.2 b	5.22 ab	22.50 a	12.72 b	0.27 b	3.68 b
	水田	12	309.1 a	5.47 a	24.00 a	20.23 a	0.41 a	5.30 ab
B 层	花生地	25	388.0 a	4.88 b	20.25 a	5.22 a	0.19 ab	7.15 a
	果园	4	298.0 b	4.67 b	24.71 a	3.36 a	0.11 b	5.72 b
	水田	12	357.3 ab	5.48 a	21.17 a	5.20 a	0.24 a	5.94 b

注:多重比较采用最小显著差数法,处理之间有相同字母者差异不显著。

## 2.3 土壤肥力性质空间分布与评价

本节列出表层土壤黏粒、有机质、全 P、全 K 等单项土壤参数的空间分布与评价图,以显示小流

域土壤肥力的空间分布特征。

小流域内土壤表层黏粒含量的插值分析(图 2)表明,小流域内 61.8% 面积的土壤黏粒含量 > 300

g/kg, 其中花生地中 83.6% 面积的土壤在此范围内, 比例高于水田 (54.6%), 果园土壤表层黏粒含量最低。花生地坡上部黏粒含量的相对高值可能是由于坡顶土壤黏粒相对不易随地表径流流失。

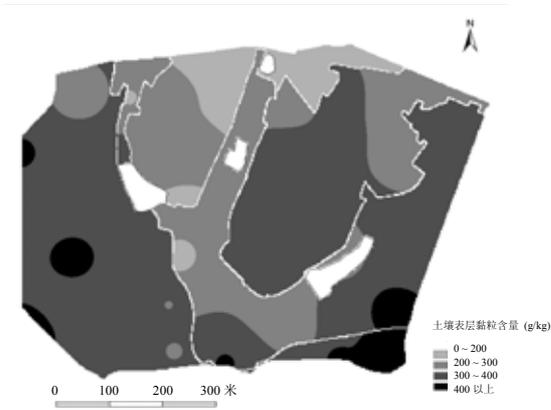


图 2 土壤表层黏粒分布图

Fig. 2 Distribution of clay particle in surface horizon

土壤表层有机质含量有 42.6% 的面积处于中度缺乏状态 (图 3)。旱地表层有机质缺乏程度高于水田。其中, 距离居民点较近的水田土壤有机质较高, 可能是有机肥就近施用的结果; 而小流域出口处水田土壤有机质较高, 则是由于谷底水分条件较好, 利于作物及绿肥生长从而增加残茬还田量所致。插值分析显示 (图 4), 小流域内表层土壤全 P 大部分 (94.3%) 处于中度缺乏状态, 这与以前的研究相一致<sup>[9]</sup>。表层土壤全 K 大部分 (97.3%) 处于中度缺乏状态 (图 5), 其中 12.0% 的面积处于严重缺乏状态, 主要分布在果园 (10.2%)。

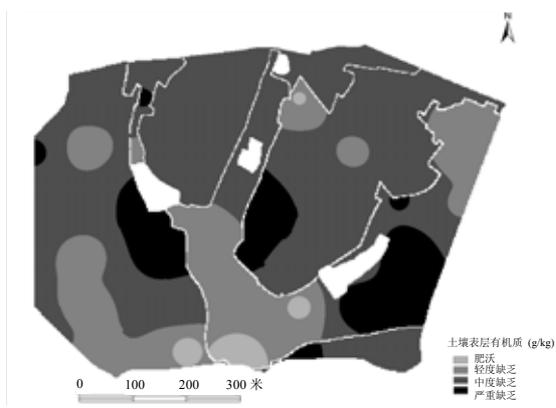


图 3 土壤表层有机质分布评价图

Fig. 3 Distribution and evaluation of organic matter in surface horizon

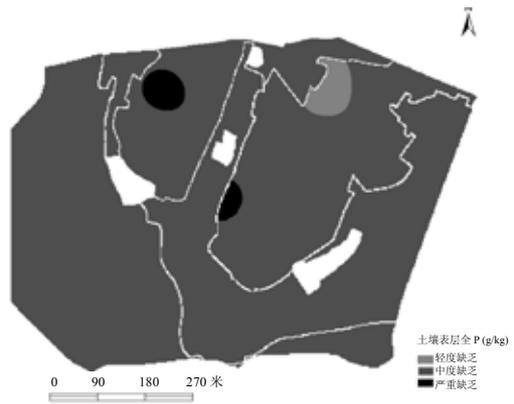


图 4 土壤表层全 P 分布评价图

Fig. 4 Distribution and evaluation of total phosphorus in surface horizon

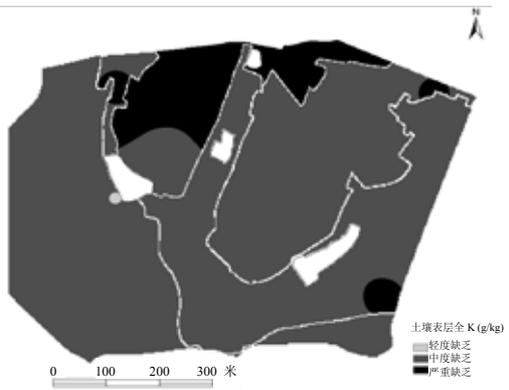


图 5 土壤表层全 K 分布评价图

Fig. 5 Distribution and evaluation of total potassium in surface horizon

### 2.4 土壤综合肥力评价

利用 GIS 的叠加分析功能对土壤各种理化性质的综合评价表明 (表 4, 图 6): 小流域约 8.9% 的面积处于低肥力水平, 主要是果园类型区 (7.8%); 流域内 76.6% 的面积处于较低的肥力水平, 50.4% 位于花生地类型区; 小流域 11.7% 的面积处于中等肥力水平, 主要位于水田类型区 (8.1%)。

表 4 不同等级综合肥力土壤所占面积 (hm<sup>2</sup>)

Table 4 Soil fertility of fields under different land uses

肥力等级	花生地	水田	果园
低	0.2	0.2	3.6
较低	23.1	9.6	2.5
中等	1.7	3.7	0.0

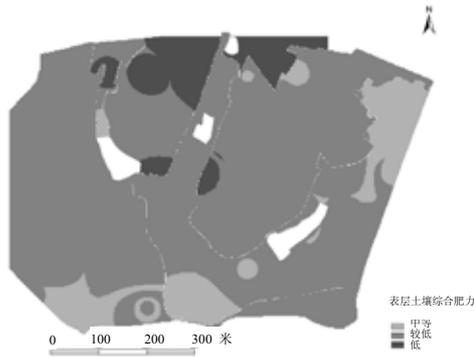


图 6 土壤表层综合肥力评价图

Fig. 6 Evaluation of overall soil fertility in surface horizon

果园多数土壤处于低肥力状态，这与其土层薄和施肥少有关。相对而言，离居民点较近和流域出口处的水田地块具有较高的土壤肥力状况。由于农民有就近施用有机肥的习惯，因此流域东侧的地块相对具有较高肥力；流域出口处于下游沟底，地面平整且水分条件好，因而利于保肥，这与有机质分布规律较相似。

### 3 结论

本研究对小流域尺度不同土地利用类型区进行密集采样和综合分析，结合 GIS 技术研究小流域尺度土壤养分等性质的空间与剖面分布，促进了对复杂农业小流域土壤肥力性质的空间分析评价。

小流域内土壤酸化明显，旱地（包括花生地和果园）的酸度高于水田。小流域内土壤保肥力处于中等水平以上。小流域内大部分土壤养分储量处于中度缺乏程度以上。耕作管理措施及自然淋洗使土壤物理化学性质发生改变，从而改变了土壤肥力状况，不同土地利用方式下的土壤性质空间分异明显，水田肥力相对较高，这与有机质还田和绿肥种植等有关，也说明水田可能是小流域养分流失的汇。

#### 参考文献：

[1] 刘洪顺, 王继新, 梁红. 江南红壤丘陵区土壤湿度模拟和土壤季节性干旱的研究 // 杨炎生, 信迺途主编. 中国红壤地区农业综合发展与对策. 北京: 中国农业出版社, 1995: 148-152

[2] 王明珠. 我国南方低丘红壤区立体农业模式. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7 (4): 263-266

[3] 张桃林主编. 中国红壤退化机制与防治. 北京: 中国农

业出版社. 1999: 7-75

- [4] Stoorvogel JJ. Optimizing land use distribution to minimize nutrient depletion: A case study for the Atlantic Zone of Costa Rica. *Geoderma*, 1993, 60: 277-292
- [5] Fu BJ, Chen LD, Ma KM, Zhou HF, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shanxi, China. *Catena*, 2000, 39: 69-78
- [6] 林培. 土地资源学. 北京: 北京农业大学出版社, 1990: 140-141
- [7] Cheng XF, Shi XZ, Yu DS, Pan XZ, Wang HJ, Sun WX. Using Gis spatial distribution to predict soil organic carbon in subtropical China. *Pedosphere*, 2004, 14 (4): 425-431
- [8] Shen RP, Sun B, Zhao QG. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China. *Pedosphere*, 2005, 15 (3): 347-355
- [9] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价. *土壤*, 1995, 27 (3): 119-128
- [10] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价. *土壤学报*, 1995, 32 (4): 363-369
- [11] 石常蕴, 周慧珍. GIS 技术在土地质量评价中的应用——以苏州市水田为例. *土壤学报*, 2001 (3): 248-255
- [12] 王洪杰, 史学正, 李宪文, 于东升, 孙维侠, 曹志洪. 小流域尺度土壤养分的空间分布特征及其与土地利用的关系. *水土保持学报*, 2004, 18 (1): 15-42
- [13] 朱益玲, 刘洪斌, 谢德体, 蔡国学. 江津紫色土壤养分空间变异性研究——地统计学方法. *西南农业大学学报*, 2002, 24 (3): 207-210
- [14] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例. *土壤学报*, 2004, 41 (1): 20-27
- [15] 盛建东, 杨玉玲, 陈冰, 武红旗. 土壤总盐 pH 及总碱度空间变异特征研究. *土壤*, 2005, 37 (1): 69-73
- [16] Lam NSN. Spatial interpolation methods: A review. *Am Cartographer*, 1983, 10 (2): 129-149
- [17] Ware C, Knight W, Wells D. Memory intensive algorithms for multibeam bathymetric data. *Computers and Geosciences*, 1991, 17 (7): 985-993
- [18] Weber D, Englund E. Evaluation and comparison of spatial interpolators. *Math. Geol*, 1992, 24 (4): 381-391
- [19] Weber D, Englund E. Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Math. Geol.*, 1994, 26 (5):

- 589-603
- [20] Watson DF, Philip GM. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-processing*, 1985, 2: 315-327
- [21] Ries L. Areas of influence for IDW-interpolation with isotropic environmental data. *Catena*, 1993, 20 (1/2): 199-205
- [22] Bartier PM, Keller CP. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance Weighting (IDW). *Computers and Geosciences*, 1996, 22 (7): 195-799
- [23] Kitsiou D, Karydis M. Categorical mapping of marine eutrophication based on ecological indices. *The Science of the Total Environment*, 2000, 255: 113-127
- [24] 王珂, 许红卫, 史舟, Bailey JS, Jordan C. 土壤钾素空间变异性和空间插值方法的比较研究. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6 (3): 318-322
- [25] Xu FL, Tao S, Dawson RW, Li BG. A GIS-based method of lake eutrophication assessment. *Ecological Modelling*, 2001, 144: 231-244
- [26] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [27] 王昌全, 李叔南, 夏建国, 伍钧. 西南红、黄壤粘粒组成及土壤保肥性能的研究. *四川农业大学学报*, 1996, 14 (2): 211-214, 218
- [28] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组著. 中国土壤系统分类检索. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [29] 李学垣主编. 土壤化学. 北京: 高等教育出版社, 2001: 353
- [30] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 钦绳武, 郑剑英, 王周琼. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数. *土壤通报*, 1996, 27 (4): 145-151
- [31] 朱永官, 罗家贤. 我国南方一些土壤的钾素状况及其含钾矿物. *土壤学报*, 1994, 31 (4): 430-438

## Spatial Distribution and Evaluation of Soil Fertility in a Small Catchment in Southern Hilly Region of China

TANG Jia-liang<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, WANG Ming-zhu<sup>1</sup>, ALEXANDER Thimm<sup>2</sup>, HARALD Zepp<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

<sup>2</sup> Geographical institute, Ruhr University of Bochum, Bochum, 44780, Germany

**Abstract:** With the aid of the spatial analyst module of the GIS software, spatial distribution of soil fertility was evaluated and mapped based on land use types in the case catchment, Sunjia catchment, in low hilly area of subtropical China. Results suggested that soil acidification was more obvious in dry lands than in paddy fields. On average soil nutrient retentivity of the fields was above the medium level. About 42.6% of the surface soil in the catchment was moderately deficient in organic matter. It was worse in upland fields than in paddy fields. 94.3% of the surface soil was moderately deficient in total phosphorus and 97.3% of the surface soil was moderately deficient in total potassium. The distinct differences in soil properties were results of different land uses. For example, incorporation of crop stalks into paddy field, planting of green manure. Results of the overall evaluation indicated that soil fertility was higher in paddy fields than in uplands.

**Key words:** Small catchment, Soil fertility, Land use, GIS, Spatial distribution, Evaluation