

豫南水耕地土壤肥力评价及其 与水稻产量相关分析

冯婉婉, 张学雷*, 段金龙

(郑州大学 自然资源与生态研究所, 河南 郑州 450001)

摘要: 以河南省南部潢川县伞陂镇为例, 选取土壤全 P、速效 P、速效 K、缓效 K、有机质、pH 值、全 N、质地、阳离子交换量(CEC)与容重 10 个土壤肥力因子作为水耕地肥力评价因子, 利用层次分析法进行土壤肥力评价, 运用 ENVI 4.5 提取该镇耕地信息, 利用 ArcGIS 9.3 地统计分析模块生成水耕地土壤评价图。对各项土壤肥力因子与当地代表性作物水稻产量数据进行相关和多元逐步回归分析, 评估水稻产量和土壤肥力因子之间的关系, 并验证肥力评价的结果。结果表明: 研究区水耕地土壤肥力优等级占全镇面积 17.39%, 中等级占 70.86%, 差等级占 11.75%; 速效 P, 速效 K, 有机质, 缓效 K, 全 P 等评价单因子以及综合评价分值与水稻产量都具有较高的正相关性, 显示土壤肥力评价因子的选取和评价结果具有较高的科学性与可信度。

关键词: 豫南; 水耕地土壤肥力; 评价; 水稻产量; 相关分析; 回归分析

中图分类号: S158 S511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2012)06-0065-06

Fertility Evaluation of Arable Paddy Soil and Its Correlation with Rice Yield in South Henan Province

FENG Wan-wan, ZHANG Xue-lei*, DUAN Jin-long

(Institute of Natural Resources and Ecoenvironment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the soil samples collected in Sanpi town, Huangchuan county in south Henan province, some soil properties including total P, available P, available K, slowly available K, organic matter, pH value, total N, texture, cation exchange capacity and bulk density were selected as indicators to evaluate the paddy soil fertility using the method of AHP together with ENVI 4.5 and ArcGIS 9.3 tools. The correlation analysis and multiple regression analysis of soil evaluation factors and rice yield were conducted to verify the relationship of rice yield and soil properties. Results showed that the area of medium class soil was the largest accounting for 70.86%, the good 17.39% while the poor 11.75%. Some factors such as total P, available P, available K, organic matter and slowly available K were highly correlated to the rice yield, showing the good confidence of these factors and the evaluation results.

Key words: south Henan province; paddy soil fertility; evaluation; rice yield; correlation analysis; regression analysis

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础, 是地球生物圈的重要组成部分^[1]。土壤肥力是土壤的本质属性, 目前土壤肥力的评价方法还没有统一的规范与标准^[2]。通常, 土壤肥力的评价方法可分为定

性评价和定量评价^[3]。定性评价方法是通过综合判断土壤性质来对土壤肥力做出相对好或坏的评价, 目前这种方法应用越来越少。定量评价方法利用各种数学模型量化土壤属性并计算出土壤肥力的综合

收稿日期: 2011-11-00

基金项目: 河南省重大公益性科研项目(081100911500-1, 081100911600-1)

作者简介: 冯婉婉(1986-), 女, 河南济源人, 在读硕士研究生, 研究方向: 土地资源遥感与信息技术。

* 通讯作者: 张学雷(1960-), 男, 江苏沛县人, 教授, 主要从事土地资源遥感与信息技术研究。E-mail: ZXLezzu@zzu.edu.cn

得分值,通常越好的土壤得分越高。这种方法更能全面、真实地反映土壤肥力演变规律^[4]。近些年,随着我国学者对土壤肥力研究的不断深入,各种数学评价方法日趋多样性和综合性^[5]。层次分析法是一种定性与定量分析相结合的综合集成的系统工程方法,它将人们以主观判断为主的定性分析定量化,将各种判断要素之间的差异数值化,帮助人们保持思维过程的一致性,目前广泛应用于权重的确定^[6]。随着计算机信息技术的发展,地理信息系统的出现使得在空间和时间上研究土壤肥力各指标属性的变异情况成为可能,GIS 技术强大的空间分析和信息管理功能,为耕地肥力评价和耕地资源管理信息系统提供了强大的技术支持^[7]。土壤肥力因子与作物产量关系的研究方法有相关分析法和主成分分析法^[8-9],相关分析与偏相关分析能够在排除其他因素的情况下,反映 2 个变量的相关关系,因此,相关分析得到广泛应用^[10],多元逐步分析能够反映多变量之间的关系,同样可以应用于评价因子与作物产量之间的关系。

本研究选取土壤有机质、全 N、全 P、速效 P、速效 K、全 K、pH 值、阳离子交换量(CEC)和土壤容重作为土壤肥力评价指标,使用层次分析法确定权重来评价研究区的耕地土壤肥力,然后将评价结果与该区的水稻产量做相关分析和多元逐步分析,检验评价结果。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

伞陂镇地处河南省潢川县城东 5 km,位于 115.069°E 到 115.211°E 和 32.059°N 到 32.204°N 之间,属淮河流域。研究区内地势南高北低,略向东倾,主要为平原区。平均海拔约 64 m,白露河自北向南流经该镇,地貌属剥蚀侵蚀丘陵,成土母质为洪冲积物,土壤类型主要为水稻土(水耕人为土),也适宜其他各种作物的生长,如小麦和油菜。研究区属亚热带向暖温带过渡的季风湿润气候,春夏秋冬四季分明,日照充足。年平均气温 15.3℃,年平均无霜期 226 d,平均日照时数 2 092 h,太阳辐射量 118.25 kcal/cm²,平均降水 1 087 mm,但年内年际分配不均,年内主要集中于夏季。

1.2 数据采集与分析

本次土壤样品主要是水耕地范围,土壤采样采用 500 m×500 m GPS 定位的规则格网,实际共采

样 293 个。在实验室中对样品土壤进行风干、研磨、过筛处理后,运用外加热法、开氏法、电位法等分析方法^[11],得到土壤样本的速效 K、速效 P、全 N、全 P、缓效 K、缓效 P、有机质、pH 值、容重和 CEC 的分析数据,将这些土壤因子作为该镇水耕地土壤肥力评价指标,并在 Access 中建立土壤属性数据库。

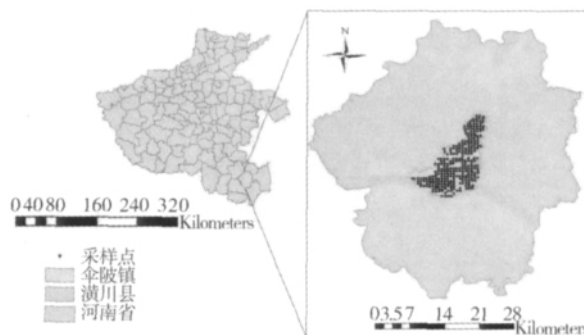


图 1 土壤采样点分布

本研究基础数据还包括潢川县第二次土壤普查 1:5 万地形图,潢川县行政区划图,1:5 万土壤图和中巴资源卫星 2006 年研究区遥感影像。基础数据的配准和几何校正工作在 ArcGIS 9.3 中完成,遥感影像的分类解译在 ENVI 4.5 中完成,采用监督分类中的最大似然分类法提取研究区的耕地信息。

利用 ArcGIS 9.3 地统计分析模块对采样点进行插值分析,建立单因子分布图,结合层次分析法建立土壤肥力综合评价图。采样点属性数据的常规统计分析在 SPSS 16.0 软件中完成,土壤肥力评价因子与水稻产量的相关分析与多元逐步回归分析在 SPSS 16.0 中完成。

1.3 土壤肥力评价方法

层次分析法要求将评价指标作为一个层次,将每一层从高到低排列,建立多层次的递阶结构,上下层次分为不同的重要性等级来构造判断矩阵。构造判断矩阵时,邀请多个专家和决策者进行判断和问卷调查,得到指标间准确的重要性级别(表 1、2、3)。

表 1 层次分析标度

标度	含义
1	表示 2 个元素相比,具有同样重要性
3	表示 2 个元素相比,前者比后者稍微重要
5	表示 2 个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示 2 个元素相比,前者比后者强烈重要
9	表示 2 个元素相比,前者比后者绝对重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断矩阵的中间值
倒数	若元素 i 和 j 比较得 a_{ij} ,则因素 j 与因素 i 相比得 $1/a_{ij}$

利用和积法求解判断矩阵,得到判断向量和特征值。对判断矩阵每一列归一化之后得到权重向量 W ,依照 $\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$ 求得最大特征根,其中 $(AW)_i$ 表示向量 AW 中的第 i 个分量。同时对向量进行一致性检验,一致性系数 $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) / RI$, RI 为一致性指标, n 为矩阵阶数。当 $CI < 0.1$ 时,符合一致性检验的要求,最后求得 $CI = 0.045\ 15$,符合要求。

表 2 平均随机一致性指标

指标	n														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.58	1.59

表 3 土壤肥力因子判断矩阵和权重

评价因子	有机质	速效钾	速效磷	pH	全氮	质地	全磷	CEC	容重	缓效钾	权重
有机质	1	1/5	1/5	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/9	1/9	0.236 740
速效钾	5	1	1/2	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	1/5	1/6	0.176 174
速效磷	5	2	1	1/3	1/3	1/3	1/4	1/5	1/5	1/5	0.153 386
pH	7	3	3	1	1/2	1/4	1/3	1/3	1/3	1/4	0.137 351
全氮	7	3	3	2	1	1/2	1/3	1/3	1/3	1/4	0.095 984
质地	7	3	3	4	2	1	1/2	1/2	1/2	1/3	0.067 871
全 P	7	5	4	3	3	2	1	1/2	1/2	1/3	0.059 085
CEC	9	5	5	3	3	2	2	1	1/2	1/2	0.033 104
容重	9	5	5	3	3	2	2	2	1	1/2	0.028 298
缓效钾	9	6	5	4	4	3	3	2	2	1	0.012 025

步回归分析在 SPSS16.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤主要理化性质的统计特征值

变异系数(CV)的大小表示土壤肥力因子空间变异性的 大小,CV = 0.1 为弱变异,CV 在 0.1~1 为中等变异,CV = 1 为强变异。从土壤肥力因子统计分析结果(表 4)可以看出:土壤 pH 值的变异性最小,为弱变异,说明土壤 pH 值在土壤中比较稳定,各个样

1.4 土壤肥力与水稻产量相关分析和逐步回归分析

在水稻的整个生育期中,作物吸收的养分 50%~60%来源于土壤,多年来,人们进行大量的试验与统计分析,来探测土壤肥力对水稻产量的影响^[12]。相关分析和回归分析是一种传统的方法,张正斌等^[15]、王冬梅等^[16]、季彪俊等^[15]都通过这种方法对有机质、全 P、全 K、速效 P 等土壤养分与作物产量的关系进行了研究,在一定程度上揭示了不同的土壤与作物产量间的关系。本次研究相关分析与逐

点差异性很小。其他单因子指标都是中等变异,速效 P 的变异系数最大;速效 P 偏态最大,可能是由于磷在土壤中的移动性小及施磷情况不同而导致其分布不均,这也与整个区域地形、土壤类型及土壤质地等有关^[16];缓效 K 的标准差最大,区间跨度比较大,容重的标准差最低;结合图 2 可见,速效 P 属于对数正态分布,平均值在众数左边,呈现左偏分布,其他因子为正态分布;该镇土壤全 P 水平比较低,土壤全 N 含量比较高,容重,缓效 K,pH 值分布均衡。

表 4 耕地土壤主要理化性质的描述性统计

评价因子	均值	偏态	峰度	分布类型	变异系数	标准差	最小值	最大值
有机质/(g/kg)	20.17	0.29	6.04	正态	0.20	4.08	6.60	42.80
全 N/(g/kg)	1.17	1.35	7.80	正态	0.25	0.30	0.52	2.77
全 P/(g/kg)	0.34	1.56	6.25	正态	0.33	0.12	0.15	0.86
pH	5.86	0.75	0.47	正态	0.08	0.49	4.93	7.63
CEC/(cmol/kg)	14.20	0.40	5.18	正态	0.25	3.53	0.40	31.00
缓效 K/(mg/kg)	424.51	2.36	12.80	正态	0.40	169.83	15.40	1 540.00
速效 P/(mg/kg)	9.47	2.79	13.35	对数正态	0.97	9.14	0.10	68.90
速效 K/(mg/kg)	65.43	1.83	10.24	正态	0.44	28.68	21.10	255.90
容重/(g/cm ³)	1.32	-0.03	0.51	正态	0.87	0.11	1.00	1.61

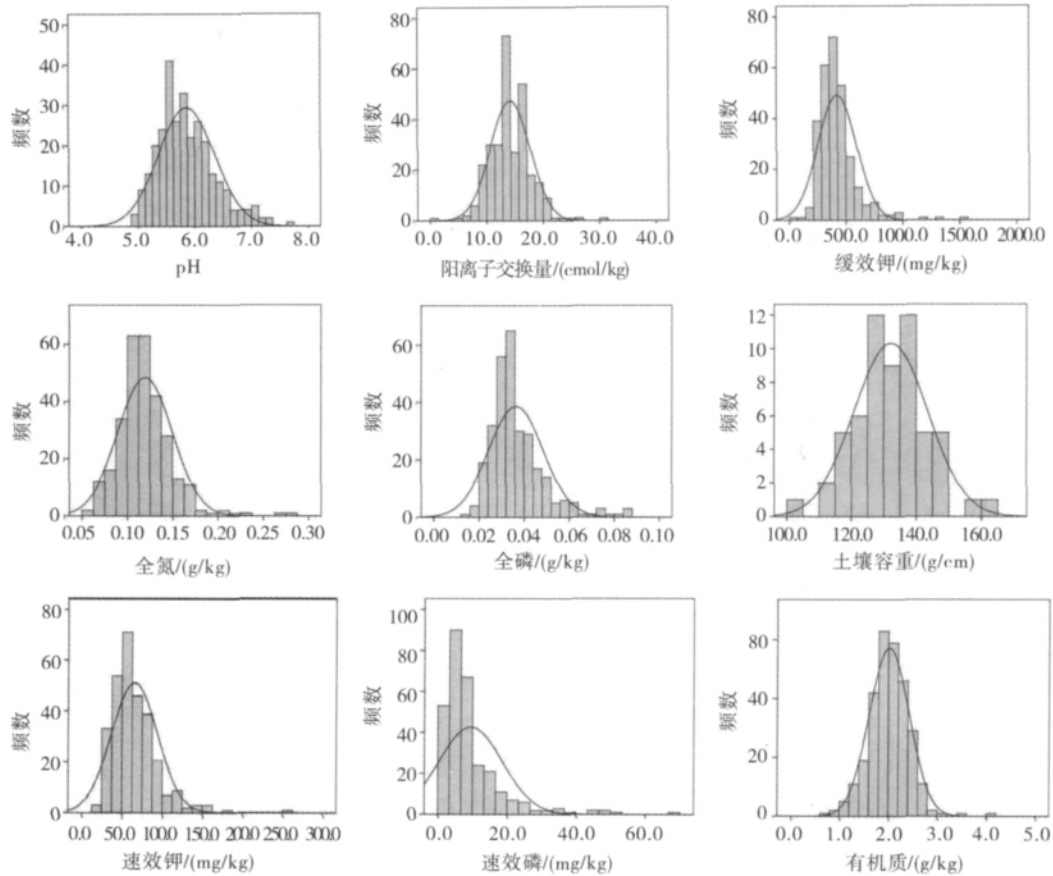


图 2 土壤评价因子分布情况

2.2 耕地土壤肥力评价结果

根据表 5,采用将土壤肥力因子指标划分为优、中、差三等,将优等级赋值为 3,中等级赋值为 2,差等级赋值为 1,利用下面公式计算土壤等级综合值:

综合值 $IFI = 0.2367 \times \text{有机质} + 0.1762 \times \text{速效 K} + 0.1534 \times \text{速效 P} + 0.1374 \times \text{pH 值} + 0.096 \times \text{全 N} + 0.0679 \times \text{质地} + 0.0591 \times \text{全 P} + 0.0331 \times \text{CEC} + 0.0283 \times \text{容重} + 0.0120 \times \text{缓效 K}$ 。

根据以上计算得到伞陂镇的土壤肥力等级综合值范围为 1.142~2.551,根据全国农业地力等级划分标准^[17],结合该地区实际生产情况,将伞陂镇耕地土壤肥力划分为优、中、差 3 个等级,在 ArcGIS 地统计分析模块中得到耕地土壤肥力等级分布图(图 3),受豫南丘陵水稻分布区地形影响,耕地斑块破碎。通过 ArcGIS 空间分析功能,可以方便统计出优、中、差 3 个等级耕地土壤肥力的分布面积(表 6)。计算可知,伞陂镇耕地大部分为中等,中等耕地面积 26 km²,占全镇总耕地面积中的 70.86%;优等耕地与差等耕地的面积相对较少,优等耕地占 17.39%,主要分布在中部地区以及东南部分区域,西南

部也有小面积分布,差等耕地占 11.75%,主要分布在北部地区以及南部地区,分布比较分散。

表 5 土壤主要理化性质的分级标准

评价因子	优	中	差
有机质/(g/Kg)	>25	20~25	<20
全 氮/(g/kg)	>1.2	1.0~1.2	<1.0
全 磷/(g/kg)	>1.0	0.6~1.0	<0.6
速效 P/(mg/kg)	>15	10~15	<10
速效 K/(mg/kg)	>100	50~100	<50
缓效 K/(mg/kg)	>900	400~900	<400
CEC/(cmol/kg)	>20	15~20	<20
pH	6.5~7.5	5.5~6.5、 7.5~8.5	<5.5、>8.5
质 地	壤土、粉 砂壤土	黏壤土、粉砂 质黏壤土	壤黏土
容重(g/cm ³)	1.0~1.2	0.8~1.0、 1.2~1.5	<0.8、>1.5

表 6 耕地土壤肥力等级面积及百分比

IFI	面积/km ²	百分比/%
优 (>1.87)	6.417 259	17.39
中 (1.57~0.87)	26.146 567	70.86
差 (<1.57)	4.335 462	11.75

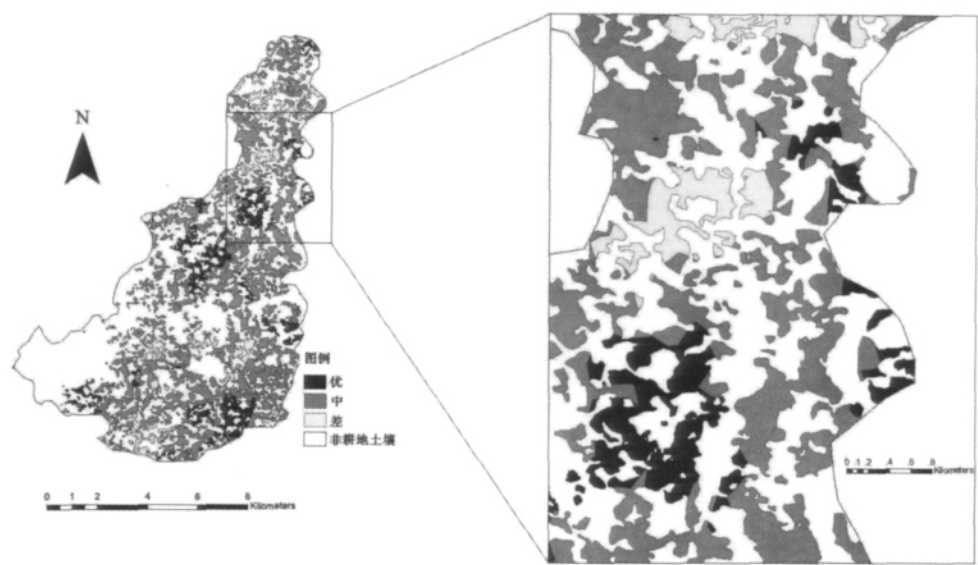


图 3 耕地土壤肥力等级分布

2.3 土壤肥力与水稻产量关系

为了分析单因子和综合评价结果与水稻产量的关系,以行政村为单位,对伞陂镇水稻产量进行实地定位信息采集,按照单产高(6 750 kg/hm²)、中(5 250~6 750 kg/hm²)、低(5 250 kg/hm²)水平,选定代表性点位;原则上每个行政村按照高、中、低水平各取一个点,现场采集水稻单位面积产量、施肥情况、水源情况等信息和 GPS 定位数据,共采得 48 个点。对这些定位点的土壤肥力单因子、综合评价分值与水稻产量进行相关分析(表 7)。结果显示,速效 P,速效 K,有机质,缓效 K,全 P 均与水稻产量具有较高的正相关性,耕地土壤肥力评价综合分值与各个单要素的相关性更高。但同时也可看出,由于农业生产过程的复杂性,影响水稻产量的因素多且复杂,单从土壤要素看也有例外的情况,如土壤 CEC 与水稻产量的相关系数为 0.194,呈现出较弱的相关性,这与季彪俊^[18]对安徽省多雨山区土壤养分因子与水稻产量的相关性分析结

果和张正斌^[19]等人对陕西省 54 个县市 10 种土壤营养物质和小麦产量相关性的研究结果相似。可以推断,除了土壤本身影响之外,还受到施肥、管理、投入等人为因素的影响。在相同施肥水平和农作技术条件下,土壤中速效 P、速效 K、缓效 K、有机质含量高的土壤,产量也较高;同时,土壤养分相互协调,达到平衡状态时才是土壤肥力好的标志,因此配合增施土壤中的缺少养分,才能获得水稻的高产^[20-21]。

土壤肥力等级综合值 *IFI* 是反应土壤肥力的综合指标,由表 7 中可知,*IFI* 与水稻产量的相关性系数为 0.483,相关极显著。对土壤肥力综合评价分值 *IFI* 与水稻产量进行线性回归分析,回归方程为: $y=273.19+124.418\times IFI$,*y* 是水稻单位产量(kg);将回归结果经过 *t* 检验,土壤肥力综合评价分值与水稻产量达到偏回归显著相关性(概率 $P<0.05$)。结果表明,综合评价分值与水稻产量之间存在着较好的线性关系。

表 7 肥力因子与水稻产量相关分析

评价因子	速效磷	速效钾	全氮	有机质	pH	缓效钾	全磷	CEC	<i>IFI</i>	水稻产量
速效磷	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
速效钾	0.695**	1	—	—	—	—	—	—	—	—
全氮	0.033	-0.014	1	—	—	—	—	—	—	—
有机质	0.177	0.187	0.734**	1	—	—	—	—	—	—
pH	-0.067	0.003	-0.200	-0.288	1	—	—	—	—	—
缓效钾	0.650**	0.764**	0.06	0.151	0.047	1	—	—	—	—
全磷	0.870**	0.595**	0.266	0.321*	-0.16	0.728	1	—	—	—
CEC	0.355*	0.406*	0.213	0.271	-0.233	0.417**	0.388*	1	—	—
<i>IFI</i>	0.621**	0.657**	0.466**	0.658**	0.048	0.604**	0.681**	0.552**	1	—
水稻产量	0.393*	0.425**	0.066	0.289*	0.088	0.36*	0.303	0.194	0.483**	1

注: *5%显著水平 **1%显著水平。

2.4 水稻产量和土壤肥力因子多元逐步回归分析

将土壤肥力评价因子与水稻产量进行逐步回归分析,回归模型为:

$$y = 740.77 + 0.454x_1 + 88.584x_2 - 2.701x_3 - 469.408x_4 + 4.45x_5 - 2077.984x_6 + 0.185x_7 + e,$$

式中, y 表示水稻单位产量(kg); x_1 表示速效 K(mg/kg); x_2 表示有机质(g/kg); x_3 表示容重(cmol/kg); x_4 表示全 N(g/kg); x_5 表示速效 P(mg/kg); x_6 表示全 P(g/kg); e 是残差。

在逐步回归分析中,相关系数 $R = 0.582$,模型的拟合度中等偏上,说明豫南水耕地土壤肥力质量等级与水稻产量之间关系受土壤本身性质的影响达到中等偏高的水平;回归方程的检验结果显示: F 值检验为显著,偏差概率接近于 0,说明此回归方程能够从一定程度上反映土壤肥力因子与水稻产量之间的回归效应。

3 结论与讨论

1) 利用层次分析法确定耕地土壤肥力评价因子的权重,在 ArcGIS 中分析得出豫南典型水稻土分布样区耕地土壤的肥力等级,结果显示,该镇水耕地大部分为中等,中等耕地面积 26 km²,占全镇总耕地面积的 70.86%;优等耕地与差等耕地的面积相对较小,其中优等耕地占 17.39%。

2) 速效 P、速效 K、有机质、缓效 K、全 P 与水稻产量都具有较高的正相关性,耕地土壤肥力评价综合分值与各个单要素的相关性更高一些。但同时也可看出,由于农业生产过程的复杂性,影响水稻产量的因素多且复杂,单从土壤要素看也有例外的情况,这与之前相关研究结果相似。对土壤肥力综合评价分值 IFI 与水稻产量进行线性回归分析,土壤肥力综合评价分值与水稻产量达到偏回归显著相关性(概率 $P < 0.005$)。表明综合评价分值与水稻产量之间存在着较好的线性关系。

3) 由于时间和经费等因素限制,本研究样区仅限伞陂镇的水耕地,面积较小,但是该研究样区是豫南水稻土的典型种植区,在水稻土耕作和水稻生产上有很强的代表性,所以选取该样区仍具有实用及示范作用,如果下一步能将研究区域扩大,将会起到更好的辐射作用。

4) 本研究只考虑了可能影响土壤肥力质量的 10 个要素作为耕地土壤评价因子,除了土壤自身影响之外,水稻产量还受到施肥、管理、投入等人为因素的影响。考虑到农业生产的复杂性,在以后的工作中应该在这些方面予以重点加强。

参考文献:

[1] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境、土壤质量

的定义与评价方法[J]. 土壤,1997(3): 113-120.

- [2] Stam atiadis s, Werner m, Buchanan m. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in abroccolifield [J]. Appl Soil Ecol, 1999,12: 217-225.
- [3] Snakin V V, Kechetov P P, Kuzovnik ova t a, et al. The system of assessment of soil degradation [J]. Soil Tech, 1996,8: 331-343.
- [4] 张华,张甘霖,漆智平,等. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤,2001(6): 326-330.
- [5] 吴殿廷,李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(2): 264-268.
- [6] Arshadd m a. Tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroeco systems [J]. Soil Till Res, 1999,53: 1-2.
- [7] 郭笃发,王秋兵. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究[J]. 土壤学报,2005,42(3): 523-527.
- [8] 段项锁,薛正平,杨星卫,等. 精准农业土壤养分与水稻产量关系模型研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(1): 62-65.
- [9] 高祥照,胡克林,郭焱,等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. 中国农业科学,2002,35(6): 660-666.
- [10] 李法虎. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. 农业工程学报,2003,19(6): 64-69.
- [11] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报,2000,55(5): 555-566.
- [12] 路海东,薛吉全,马国胜,等. 陕西榆林春玉米高产田土壤理化性状及根系分布[J]. 应用生态学报,2010,21(4): 895-900.
- [13] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京:中国标准出版社,1997.
- [14] 季彪俊. 基于神经网络的福建省水稻产量与土壤及气象因子关系分析[D]. 南京:南京农业大学,2006.
- [15] 张正斌,王德轩. 土壤营养物质和小麦产量关系研究. 水土保持通报[J],1990,10(2): 58-64.
- [16] 王冬梅,韩晓日,王春枝,等. 长期施肥对棕壤主要养分生物有效性的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2005-10,36(5): 575-579.
- [17] 甘海华,彭凌云,卢英,等. 广东新会地区耕地土壤肥力指标的时空变异性[J]. 应用生态学报,2007: 18(7): 1464-1470.
- [18] 中华人民共和国农业部. 中国出版社农业产业化标准 NY/T309-1996: 中国耕地类型与肥力分类[S]. 北京:中国标准出版社,1996: 1-25.
- [19] Shukla U S, Chauhan P S. Efficiency of coated urea material for rice (*Oryza sativa*) under partially reclaimed sodic soil[J]. Indian Journal of Agriculture Science, 1998,68(1): 42-43.
- [20] 尹秀英,许文良,冯君. 吉林省稻田土壤营养元素与水稻产量的相互关系[J]. 长春科技大学学报,2001,31(1): 74-77.
- [21] 李勇,储亚云,朱彩云,等. 金坛市无氮区土壤肥力评价和对小麦基础产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(6): 15-18.