

改进灰色关联模型在秦巴山区耕地地力评价中的应用

方睿红, 常庆瑞, 宋利珍, 宋丰骥

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以秦巴山区陕西省安康市汉阴县为例, 在通过土壤调查采样和室内化验分析获得的相关耕地地力数据信息的基础上, 运用层次分析、模糊评价等方法改进了灰色关联模型, 实现了耕地地力综合评价的定量化和自动化。结果表明, 该地区耕地基础地力可分为 5 级, 其中 I 级地占耕地总面积的 7.32%, II 级地占耕地总面积的 15.41%, III 级地占耕地总面积的 21.61%, IV 级地占 32.47%, V 级地占 23.18%; 研究区内耕地地力属中等偏差水平, 其中河谷阶地的耕地地力水平状况相对较好, 低山丘陵区的耕地地力水平相对较差, 中低山的耕地地力水平最差。

关键词: 秦巴山区; 耕地地力; 灰色系统; 综合评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)02-0122-05

中图分类号: S158.3

Application of Modified Grey Relational Model to Evaluating Farmland Productivity in Qinling – Bashan Mountainous Area

FANG Rui-hong, CHANG Qing-rui, SONG Li-zhen, SONG Feng-ji

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Chosen Hanyin County of Shaanxi Province as the study area, this research intended to assess the quantitative methods of farmland productivity evaluation. On the basis of field investigations, sampling and chemical analysis, the automatic and quantitative evaluation procedure was realized by adopting the modified grey relation model, which was improved with incorporation of analytics hierarchy process and fuzzy math. The proposed evaluation method is of positive significance in scientifically managing and utilizing the cultivated land resources in China. The results show that farmland productivity in the study area could be classified into five grades, with grade I accounting for 7.32% of the total area, grade II for 15.41%, grade III for 21.61%, grade IV for 32.47%, and grade V for 32.47%, respectively. The results also indicate that the farmland productivity in the study area ranged from inferior to intermediate; the farmlands of the river valleys have relatively high productivity, the farmlands of the rolling-hill areas have low productivity, and the farmlands of mountainous areas have the lowest.

Keywords: Qinling – Bashan mountainous region; farmland productivity; grey system; comprehensive evaluation

近年来, 随着我国人口不断增加和社会快速发展, 土地退化日趋严重, 滥垦滥用造成耕地浪费的现象随处可见。耕地作为人类获取粮食及其它农产品不可替代的生产资料, 目前形势不容乐观。通过耕地地力评价, 摸清区域耕地地力状况, 对提高耕地保护与管理, 促进农业结构调整和农业可持续发展具有重要的现实意义^[1]。GIS 作为一种先进的技术手段与其它数学模型, 如模糊数学法、主成分分析法、神经网络法、投影寻踪法、灰色关联法等结合起来, 在土壤质

量学方面的运用越来越广泛^[2]。如张海涛^[3]等利用 GIS 将层次分析的原理和方法引入耕地地力评价以确定参评因子的权重, 快速准确地对江汉平原后湖地区的耕地自然地力进行了综合评价; 任家强^[4]等在 GIS 技术的支持下, 针对阜蒙县耕地资源现状, 综合分析影响因素, 运用层次分析法和模糊评价法建立数学模型, 对阜蒙县耕地进行了较为科学的定量化评价; 马建军^[5]等运用灰色关联度法, 在进行黑岱沟人工复垦地生态环境调查的基础上, 对露天煤矿排土场

收稿日期: 2011-05-24

修回日期: 2011-07-16

资助项目: 国家重点基础研究(973) 发展计划项目“区域水土流失过程与趋势分析”(2007CB407203); 国家自然科学基金项目(30872073); 国家科技基础性专项重点项目“秦巴山区生态群落与生物种质资源调查”(2007FY110800-07)

作者简介: 方睿红(1987—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与 GIS 技术应用。E-mail: fangrh23@nwsuaf.edu.cn。
通信作者: 常庆瑞(1959—), 男(汉族), 陕西省子洲县人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境与 3S 技术应用研究。E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn。

土壤进行了土壤质量综合评价。本研究针对近年秦巴山区存在土壤养分分布不均、水土流失严重、环境污染防治水平低等生态环境问题,提出利用层次分析法对耕地地力指标赋权重,模糊数学方法及德尔菲方法进行数据初值化,建立改进灰色关联模型对耕地地力进行评价,针对获取的相关评价信息分析其障碍因素并提出建议和措施,为研究区提升耕地质量提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于陕西省安康市汉阴县,地理位置为北纬 $32^{\circ}38'$ — $33^{\circ}09'$,东经 $108^{\circ}11'$ — $108^{\circ}44'$,属陕南秦巴山区。东连安康市,西接石泉县,北与宁陕县交界,南与西乡、镇巴、紫阳县毗邻,县境南北长约58 km,东西宽约51 km,总土地面积为 $1\,369.95\text{ km}^2$ 。汉阴县北为秦岭屏障,南有巴山对峙,中部凤凰山横亘,山南汉江东流,山北月河横贯,形成了“三山夹两谷”的基本地形结构,从东北向西南地形剖面呈W形,海拔在300~2 120 m。整个区域位于北亚热带湿润气候区,季风性强,四季分明,年平均气温为 $15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,热量及自然降水丰沛,但时空分布不均。县内人均土地少,宜农地少,宜林宜牧地占 $2/3$;水田多且肥沃,旱地坡陡土薄。土壤类型和种类众多,以黄棕壤为主。植物资源种类繁多,南北方的兼有,主要农作物有水稻、小麦和油菜。

2 材料与方法

2.1 资料收集、野外调查与样品分析

根据调查工作需要,收集了第二次土壤普查的地形图(1:5万)、土壤图(1:5万)、2003年土地利用现状图(1:5万)和行政区划图(1:5万)等纸质图件资料,同时也收集了相关数据及文本资料。结合汉阴县实际情况,设计了《大田采样点基本情况调查表》等,主要调查内容有土壤类型、土壤性状、农田基础设施、生产性能与管理、产量水平、农民种植业等方面的情况。

利用GPS进行外业样点的定位,将大田地采样点的密度定为平均每 1 hm^2 布设2个样点,并根据需要进行适当调整。为避免施肥的影响,取样时期确定在作物收获前后,用竹铲和不锈钢土钻等工具采样,每一土样选取有代表性的田块,采用S法均匀随机采取8个点混匀后用四分法留取1 kg土样装袋以备分析。土壤取样深度为0—20 cm,按照上述布点原则和方法,在研究区耕地上共布设采样点2 420个。

采集的土壤样品经自然风干,过2 mm筛后进行

室内养分测定。化验分析方法采用相关行业标准^[6]。土壤样品测定项目包括土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾以及pH值。有机质含量测定采用油浴加热重铬酸钾容量法;全氮含量采用高锰酸钾—硫酸(加适量辛酸、还原铁粉)加热;碱解氮含量测定采用碱解扩散法;有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾含量测定采用乙酸铵浸提—火焰光度法;pH值测定采用电位法。

2.2 评价单元的划分

评价单元是由对土地质量具有关键影响的各土地要素组成的空间实体,是土地评价的最基本单位、对象和基础图斑^[7]。本研究在全面性、综合性的原则上,采用“土地利用现状图+土壤类型图+行政区划图”三图叠加的模式,最终确定评价单元3 072个。

2.3 灰色关联模

灰色系统理论(grey system theory)最早由华中理工大学邓聚龙教授提出^[8]。灰色关联度分析法是基于灰色系统的灰色过程,主要根据空间理论的数学基础,按照规范性、偶对称性、整体性和接近性四条原则,确定参考数列和比较数列之间的关系,这种关系称为关联度。其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断因素间的关联程度。它描述了一个序列中因素间相对变化的情况,即变化大小、方向、速度等的相对性,若两者相对一致,则两者关联度大,反之则小^[9]。

2.3.1 评价指标体系的建立与权重确定 耕地地力评价实质是评价地形、土壤理化性状等自然要素对农作物生长限制程度的强弱。在全国耕地地力评价指标体系框架下,选择适合当地并对耕地地力影响较大的指标作为评价因素。本研究针对秦巴山区耕地的特点,通过德尔菲法选取参评指标,确定了立地条件(包括坡度、地貌类型、坡向、海拔)、土壤性质(包括土壤类型、质地、土壤结构、剖面构型)、土壤管理(包括农田基础设施、灌溉能力)、土壤肥力(包括有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、pH值)4个项目15个因素作为汉阴县耕地地力的评价指标。并运用层次分析法^[10]求得各个指标的组合权重 ω ,具体权重分配详见表1。

2.3.2 评价指标的初值化 评价指标的初值化处理即将各个评价指标的实际值转化为评价值,使各指标数量级基本相同,以消除不同指标值量纲及数值尺寸相差过分悬殊带来的影响,避免造成非等“权”状况^[11]。根据汉阴县选取的评价指标,本研究运用模糊数学理论来确定其隶属度^[12],选定的表达评价指标与耕地生产关系的函数模型分为戒上型、峰型、直线型和概念型4种。根据隶属函数模型拟合及德尔

菲法 指标中的数量型和概念型数据初值化结果详见表 2—3。

表 1 耕地地力评价指标体系及其指标组合权重

目标层	准则层	指标层	组合权重
耕地地力评价	立地条件 (0.465 8)	坡度(0.141 1)	0.065 7
		坡向(0.141 1)	0.065 7
		海拔高度(0.263 1)	0.122 5
		地貌类型(0.454 7)	0.211 8
	土壤性质 (0.277 1)	土壤类型(0.465 8)	0.129 1
		土壤质地(0.277 1)	0.076 8
		土壤结构(0.161 1)	0.044 6
	肥力状况 (0.161 1)	土体构型(0.096 0)	0.026 6
		有机质(0.416 2)	0.067 0
		碱解氮(0.261 8)	0.042 2
		有效磷(0.161 0)	0.025 9
		速效钾(0.098 6)	0.015 9
		pH 值(0.062 4)	0.010 0
	土壤管理 (0.096 0)	灌溉能力(0.750 0)	0.072 0
农田基础设施(0.250 0)		0.024 0	

2.3.3 改进灰色关联模型 灰色关联模型中关联度计算公式的步骤为^[13]:

(1) 理想对象数列为:

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\};$$

被评价对象数列为:

$$x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} (i = 1, 2, \dots, m)$$

(2) 关联系数计算公式:

$$\zeta_0(k) = (\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|) / (|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|) \quad (1)$$

式中: $|x_0(k) - x_i(k)|$ —— x_0 数列与数列在 k 点的绝对差; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ ——因素 $i = 1, 2, \dots, m$ 在 $k = 1, 2, \dots, n$ 的最小绝对差, 也称二级最小差; $\min_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ ——二级最大差; ρ ——分辨系数, 其取值范围在 $0 \sim 1$ 之间, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

(3) 加权关联度的计算^[22]:

$$r_i = \sum_{k=1}^N \zeta_0(k) \times \omega_{ik} \quad (2)$$

式中: ω_{ik} 为各指标的组权重。本研究将所有指标都经过初值化处理, 使其数据转化为 $0 \sim 1$ 之间的无量纲值, 认为各指标中“1”是耕地地力评价最优值。以各指标最优值构成理想对象数列 x_0 , 其余评价单元序列作为被比较数据列, 根据公式 (1) 和 (2), 在 Matlab 软件中编程得到第 i 个评价单元的加权关联度 r_i 。若加权关联度 r_i 越大, 则说明第 i 个样本与理想对象数列最接近, 因而其也是最优样本, 这样可以根据加权关联度来确定评价单元序列的优劣次序^[14]。

3 结果与分析

3.1 耕地地力等级的划分与空间分布

运用改进灰色关联模型求得的加权关联度在 $0.52 \sim 0.92$ 之间, 考虑客观合理及实用性原则, 采用等间距法可确定 5 个耕地地力等级: I 级地 ($r_i > 0.84$), II 级地 ($0.76 < r_i \leq 0.84$), III 级地 ($0.68 < r_i \leq 0.76$), IV 级地 ($0.6 < r_i \leq 0.68$), V 级地 ($r_i < 0.6$), 利用 ArcGIS 9.3 进行相关图像渲染处理, 得到研究区耕地地力等级分布图(附图 4)。

表 2 数量型评价因子隶属度函数模型

函数类型	项目	隶属函数	标准指标 C	指标下限值 U_i
戒上型	有机质	$y = 1 / (1 + 0.009 723(u - c)^2)$	28.262	30.118
戒上型	碱解氮	$y = 1 / (1 + 0.000 651(u - c)^2)$	150.586	151.880
戒上型	有效磷	$y = 1 / (1 + 0.005 693(u - c)^2)$	28.423	35.831
戒上型	速效钾	$y = 1 / (1 + 0.000 417(u - c)^2)$	174.197	203.774
峰型	pH 值	$y = 1 / (1 + 0.799 102(u - c)^2)$	7.000	$U_{11} = 5.69, U_{12} = 7.14$
直线型	坡度	$y = 0.969 388 - 0.023 722x$	40.865	$y = 0$
直线型	海拔	$y = 1.278 345 - 0.000 705x$	1 813.255	$y = 0$

I 级地全部分布在研究区中部地势较平坦、灌溉条件较好的河谷阶地上。总面积为 25.74 km^2 , 占该县耕地面积的 7.32% , 耕地主要类型是水浇地和旱地, 土壤类型以水稻土为主, 主要种植作物为水稻、玉米和油菜。坡度在 3° 以下的 I 级耕地的约占 I 级地面积的 45.84% 。土壤侵蚀程度较弱, 无明显侵蚀。土壤养分含量较高。II 级地大部分分布在河谷阶地

上, 一些分布在低山丘陵地区。面积为 54.17 km^2 , 占该县耕地面积的 15.41% 。耕地主要类型是旱地和水浇地, 土壤类型主要为水稻土和黄棕壤, 少量为潮土。II 级地多位于坡度 $3^\circ \sim 15^\circ$ 区域内, 无明显侵蚀。土壤养分含量也相对较高。III 级地与 II 级地具有相似的分布特征, 主要分布在河谷阶地上, 部分在丘陵沟壑区, 少量在山地区。III 级地总面积为 75.95 km^2 , 占

该县耕地面积的 21.61%。各乡镇均有分布。Ⅲ级地主要是旱地、水浇地和部分菜地,种植作物主要以水稻、玉米为主。土壤类型多为黄棕壤,坡度在 15°以上的Ⅲ级耕地相对较多。部分地块土壤侵蚀较为明显。土壤养分含量属中等水平。Ⅳ级地主要分布在丘陵沟壑区,还有少量分布在阶地和山地上。面积为 114.14 km²,占该县耕地面积的 32.47%。除少量属水浇地和菜地外,其余均为旱地,在各土壤类型中,黄

棕壤面积最大,93.67%的Ⅳ级地坡度超过 15°。较大部分地块土壤侵蚀较为明显。土壤养分含量相对较差。Ⅴ级地主要分布在丘陵沟壑区,还有部分在山地上。面积为 81.48 km²,占全县耕地面积的 23.18%。各乡镇均有Ⅴ级地的分布,耕地的主要类型是旱地,土壤类型均为黄棕壤,都位于 15°以上的坡耕地上。种植作物主要以玉米为主,土壤养分状况较差。

表 3 概念型评价因子隶属度及描述

评价因素		评估项目								
地貌类型	指标	河谷阶地	低山丘陵	低中山						
	评估值	1.00	0.80	0.50						
农田基本设施	指标	配套	基本配套	不配套	无设施					
	评估值	1.00	0.80	0.60	0.40					
土壤质地	指标	中壤	轻壤	重壤	砂壤					
	评估值	1.00	0.90	0.85	0.70					
剖面构型	指标	A-P-B-C	A-B-C	A-BC-C	A-C					
	评估值	1.00	0.95	0.80	0.50					
灌溉能力	指标	保灌	能灌	一般	可灌	不灌				
	评估值	1.00	0.80	0.70	0.60	0.40				
土壤结构	指标	团粒	团块状	块状	棱块状	粒状				
	评估值	1.00	0.95	0.75	0.50	0.50				
坡向	指标	平地	南	西南	东南	西	东	西北	东北	北
	评估值	1.00	1.00	0.95	0.90	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
土壤类型	指标	冲积—积型潜育性水稻土	黄褐土型潜育性水稻土	黄棕壤型潜育性水稻土	黄褐土型潜育性水稻土	冲积—洪积型潜育性水稻土	冲积—洪积型潜育性水稻土			
	评估值	1	1	1	0.9	0.9	0.85			
	指标	黄褐土型渗育性水稻土	黄棕壤型沼泽化水稻土	冲积—洪积型沼泽化水稻土	黄棕壤型渗育性水稻土	黄土状或红黏土母质型	冲积—洪积型潮土			
	评估值	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80			
	指标	红色沙岩上发育的普通黄褐土	残积坡积普通黄褐土	坡积黄土状母质上发育的普通黄棕壤	坡积—残积型棕壤	红粘土或黄土状母质发育的普通褐土	片岩、板岩发育的粗骨黄褐土			
评估值	0.70	0.70	0.60	0.60	0.50	0.30				
指标	花岗—片麻岩型粗骨黄褐土	砾岩、沙砾岩粗骨黄褐土	花岗片麻岩上发育的粗骨黄棕壤	千枚、片、板岩上发育的粗骨黄褐土	千板岩发育的粗骨性黄褐土					
评估值	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30					

3.2 各地貌类型耕地地力等级特征

由于地貌类型是影响耕地地力的重要因素之一,因此不同地貌类型上的耕地等级差别较明显。汉阴县共有耕地 351.48 km²,主要分布在河谷阶地和低山丘陵,少量分布在低中山上。从地力等级的分布地域特征可以看出(表 4),等级的高低与地形地貌、土壤类型、坡度均密切相关,呈现出明显的地域分布规律。随着地力等级变差,地貌类型由较为平缓的阶地向低山丘陵和海拔较高的中低山过渡。其中,河谷阶地和低山丘陵分布耕地面积占到了总耕地的 88.36%;其余

分布在低中山上,面积仅为 40.90 km²。

汉阴县河谷阶地有月河河谷阶地和汉江谷地,月河谷地南岸有一、二、三级阶地,北岸只有一级阶地,土地利用率高。汉江谷地呈箱形,两岸坡度较陡,农田较少。河谷阶地上多分布Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ级地,没有Ⅴ级地的分布,地力水平较高,是研究区内农业生产的精华地带。

研究区内低山丘陵分布在月河以北和汉江南岸,海拔在 500~800 m,地势低缓开阔,坡度一般在 25°以下,农业区划面积较大,但粮食产量低而不稳,低山

间多宽谷坝子。低山丘陵区Ⅳ和Ⅴ级地分布较多,属中等偏下地力水平,该区域具有农、林、牧综合发展的适宜条件,开发潜力较大。

区内有秦岭中山、凤凰山低中山和巴山中低山(米

仓山),海拔高程在 800 m 以上,绝大部分地区坡陡,土层脊薄,坡面坡度一般在 25°以上。Ⅴ级地占该地区总耕地的近 90%。因此该区粮食生产潜力不大,林木生长较好,草山面积较大,适宜于林业和牧业的发展。

表 4 不同地貌类型在各肥力等级的分布情况

地力等级	河谷阶地		低山丘陵		低中山		总计	
	面积/km ²	比例/%						
I 级地	25.74	16.06	—	—	—	—	25.74	7.32
II 级地	52.16	32.54	2.01	1.34	—	—	54.17	15.41
III 级地	63.43	39.57	12.08	8.04	0.44	1.08	75.95	21.61
IV 级地	18.95	11.82	91.52	60.89	3.68	9.00	114.14	32.47
V 级地	—	—	44.69	29.73	36.79	89.95	81.48	23.18
总计	160.28	100.00	150.31	100.00	40.90	100.00	351.48	100.00

注:“—”表示无此肥力等级地类。

3.3 各等级耕地生产障碍因素与建议措施

I 级地地面平坦,水土流失较轻,土体深厚,土质好,肥力水平高,大部分又有灌溉条件,生产性能高,适合种植多种作物。但部分土壤类型如水稻土和黄棕壤在生产上存在肥力后劲不足、易受干旱威胁等障碍因素,应增施有机肥料,改善土壤结构,提高土壤抗旱保肥和供肥能力。在利用上也存在“多年连茬,重用轻养”等问题,建立合理的轮作制度和科学的施肥制度等措施进一步培肥土壤。

II 级地分布的地形也比较平缓,坡度较小,水土流失较轻,土体较厚,无明显的障碍层次,但部分地块无灌溉条件,生产性能比 I 级地低,应增施有机肥料,培肥地力。

III 级地的地形大部分比较平坦,土壤理化性状较好,生产性能较高,但比 II 级地低,原因有 3 个方面,一是坡耕地面积增多,坡度增大,水土流失增强;二是有效土层厚度、腐殖质层厚度、土壤养分含量比 I, II 级有所降低;三是有部分耕地无灌溉能力,降低了耕地生产力。在改良利用上,通过平整土地、修建梯田、增施有机肥、秸秆还田、粮草轮作、增建灌溉设施等措施,逐步培肥土壤,提高土壤的蓄水保墒能力,防止水土流失,逐步建成旱作高产基本农田。

IV 级地的生产性能中等,主要障碍因素:(1) 坡耕地坡度增大,水土流失比 III 级地增强,土层变薄,肥力下降;(2) 部分耕地无灌溉能力,在 IV 级地中,约占四级地 88.55% 的耕地无灌溉能力,严重影响耕地地力。在改良利用上,应平整土地,修建梯田,增施有机肥,培肥土壤,提高土壤的蓄水保墒能力,与此同时增建灌溉设施,引水防旱,防止水土流失,可逐步建成旱作稳产基本农田。

V 级地大部分所处的地形坡度较大,土体厚度、

腐殖质层厚度比 IV 级地低。主要障碍因素:(1) 坡度大,表层疏松,易产生水土流失。对于小于 25°的坡耕地,应采取等高耕作、等高沟垄种植、增施有机肥、粮草轮作、修筑梯田等水土保持措施,提高土壤的蓄水保墒能力,防止水土流失,逐步改良为旱作基本农田;大于 25°的 V 级坡耕地,应全部退耕还林还草。(2) 没有灌溉能力的 V 级地,应加强农业基础设施建设,增建灌溉措施,提高耕地生产能力。

4 结论

(1) 针对秦巴山区面临的生态环境问题,利用层次分析法以及模糊数学方法改进灰色关联模型对汉阴县耕地进行了快速准确的地力评价。结果表明,研究区内耕地地力属中等偏差水平。

(2) 研究区内耕地地力的灰色关联度在 0.52 ~ 0.92,耕地地力水平与地貌类型有紧密的联系,其中 I 级地都分布在中部地势较平坦、灌溉条件较好的河谷阶地上;II 级地与 III 级地多分布在河谷阶地上,一些分布在低山丘陵地区;IV 级地与 V 级地主要分布在丘陵沟壑区和山地上。针对不同等级的耕地现状,应分别采用不同的施肥、灌溉和种植方式以提高其生产力。

(3) 耕地地力评价指标的选取很大程度上决定了地力等级情况,因此如何选取更具有代表性的评价指标是今后耕地地力评价工作的一个重点。利用 GIS 和改进的灰色关联模型能较准确快速的对耕地地力进行评价研究,本研究利用基于专家经验的层次分析法对不同评价指标进行赋值,在今后的研究工作中对于权重赋值还可尝试一些基于数据本身的熵值法、加权统计法、变异系数法等方法以获得更加客观的权重值。

(下转第 131 页)

- [5] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [6] 中华人民共和国水利部. SL302—2004 水坠坝技术规范 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2004:125.
- [7] 陈跃,刘金柱,邢焕政. 安沟水坠坝新型固结排水措施效果分析[J]. 海河水利,2006(4):58-59.
- [8] 程海波,王永艳. 软地基处理中袋装砂井施工工艺[J]. 内蒙古公路与运输,2001(4):20-21.
- [9] Zhang Shenqiang, Zhu Shoujun, Liu Yulan, et al. Dynamic monitoring of the mud [J]. Agricultural Science & Technology 2008 9(4):112-117.
- [10] Zhong Denghua, Gui Bo, Liu Donghai, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam [J]. Science in China (E): Technological Sciences, 2009 52(11):3406.
- [11] 吴祥林. 聚乙烯微孔波纹管排水系统在播山沟水坠坝施工中的应用研究[J]. 中国水土保持,1996(12):36-39,43.
- [12] 汤茗辉,曹善和,刘振声,等. 阳洼水坠坝聚乙烯微孔波纹管排渗试验研究[J]. 中国水土保持,1992(6):24-29.
- [13] 王启睿,史海荣,梁振科,等. 聚乙烯微孔波纹管在堡子沟水坠坝排渗中的应用及效果[J]. 中国水土保持,1994(3):25-27,32.
- [14] 谢飙,王海宁,马良军. 高黏粒黄土地区水坠坝应用聚乙烯微孔波纹管技术研究[J]. 青海科技,2001(3):40-43.
- [15] 王伟,杨尧志. 土工织物与微孔波纹管网状排水系统分析[J]. 江南学院学报,2000(2):64-68.
- [16] 赵昌军,杨瑞卿,崔峰,等. 高黏土地区水坠坝立体网状排水技术研究[J]. 中国水土保持,2001(11):18-19,25.
- [17] 方云,谭松林,林彤. 土力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2003:66-77.
- [18] 张慧,曹力桥,方云,等. 孔隙水压力消散试验在尾矿坝安全施工中的应用[J]. 安全与环境工程,2006,13(2):76-79.
- [19] 张晨,张广超,顾亮. 黏性土的孔隙水压力消散试验与模型试验的研究[J]. 科学技术与工程,2008,8(8):2202-2205,2233.

(上接第126页)

[参考文献]

- [1] 王静宇,袁希平,甘淑. 基于GIS技术的县域耕地地力评价:以云南省寻甸县为例[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2008,33(3):1-6.
- [2] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 基于GIS和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3):100-105.
- [3] 张海涛,周勇,汪善勤,等. 利用GIS和RS资料及层次分析法综合评价江汉平原后湖地区耕地自然地力[J]. 农业工程学报,2003,19(2):219-223.
- [4] 任家强,汪景宽,李双异,等. 辽西阜蒙县耕地地力定量评价研究[J]. 土壤通报,2010,41(6):1294-1298.
- [5] 马建军,李青丰,张树礼. 灰色关联分析在黑岱沟露天煤矿土壤质量评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(7):125-129.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999:90-99.
- [7] 刘京,常庆瑞,陈涛,等. 黄土高原南缘土石山区耕地地力评价研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):229-234.
- [8] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [9] 王璐,张俊平,王长委,等. 基于灰色关联度的耕地定级评价实证分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(16):7594-7596.
- [10] 庄锁法. 基于层次分析法的综合评价模型[J]. 合肥工业大学学报,2000,23(4):582-590.
- [11] 李月芬,汤洁,李艳梅. 用主成分分析和灰色关联度分析评价草原土壤质量[J]. 世界地质,2004,23(2):169-174.
- [12] 朱国宇,黄川友,华国春. 层次分析法在水环境规划中的应用[J]. 东北水利水电,2003,21(4):1-7.
- [13] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2000:47-48.
- [14] 韩春建,梁朝信,吴克宁,等. 基于GIS技术的灰色关联度法土壤肥力综合评价[J]. 农业工程学报,2008,24(S1):53-56.