

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.021

基于分等因素组合和物元分析的耕地质量潜力研究

赵冬玲¹ 林尚纬¹ 杨建宇^{1,2} 张超^{1,2} 何珊珊¹ 张婷婷¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 为了科学测算和评估耕地质量潜力, 以河北省涿州市为研究区, 以 400 m × 400 m 规则网格为评价单元, 基于涿州市 2013 年耕地质量等别数据, 运用改进的因素组合法、层次分析法、物元分析模型等, 分别计算耕地整治的自然质量潜力和利用质量潜力。研究结果表明: 灌溉保证率和有机质含量是涿州市耕地自然质量的可改造限制因素, 且灌溉保证率是主导限制因素; 涿州市耕地基础设施水平整体偏低, 应通过水利灌排、田间道路修建、增加防护林等工程改善利用条件。通过提升可改造限制因素和影响土地利用系数的指标值, 涿州市耕地质量国家自然等、国家利用等可分别提升 0.53 等、0.73 等。提出的研究方法为精细化评估区域耕地质量、制定县域土地整治规划提供了方法参考。

关键词: 耕地质量潜力; 物元分析; 可改造因素组合; 涿州市; 土地整治

中图分类号: F301.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0181-11

Potential of Cultivated Land Quality Based on Combination of Grading Factors and Matter Element Analysis

ZHAO Dongling¹ LIN Shangwei¹ YANG Jianyu^{1,2} ZHANG Chao^{1,2} HE Shanshan¹ ZHANG Tingting¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Calculation of cultivated land quality potential is an important content of land consolidation project. In order to scientifically calculate the quality of cultivated land remediation potential and arrangement of land consolidation project, based on the analysis of the influence factors of agricultural land classification and the establishment of a set of evaluation index system of land use coefficient, the potential of cultivated land quality was evaluated from two aspects of natural quality and utilization quality. Zhuozhou City of Hebei Province was taken as a case study for the method. After analyzing the previous achievement of agricultural land classification, by using the improved factor combination method and the three qualified convertible grading factors based on classification, eight types of convertible restriction factor combinations were found. The irrigation guarantee rate and soil organic matter content were determined as the limiting factors of cultivated land quality. According to the adaptability of each limiting factor, the lifting scheme was worked out. Then, in the second step, according to the actual situation of the study area, each index which was closely related to the level of land use was analyzed. The three factor layers, including the spatial pattern of cultivated land, the level of cultivated convenience, and the level of infrastructure in the field were included, which included the following eight indexes. Based on the analytic hierarchy process (AHP), the weights of each index were calculated, and the indexes were normalized to eliminate the dimension. Then the land use level of each grid and the difference of different utilization levels were calculated by the matter element analysis. Finally, with the study of existing land remediation engineering experience and technology of GIS or RS to enhance the level of each factor, and then the land use coefficient, the natural quality index and the utilization quality index were calculated, besides, the differences of natural quality index and utilization quality index were calculated before and after remediation, at the same time the result was analyzed. The result showed that

收稿日期: 2017-06-20 修回日期: 2017-07-20

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511010-06)

作者简介: 赵冬玲(1961—), 女, 副教授, 主要从事工程测量及航空摄影测量研究, E-mail: zhaodongling@cau.edu.cn

通信作者: 杨建宇(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 技术及其土地应用研究, E-mail: ycjyang@cau.edu.cn

both natural and utilized grade of the area can be improved after the implementation of land consolidation project. The average improvement value of provincial indices of natural and utilization levels were 174 and 167, respectively. The provincial natural quality grade was promoted by an average of 0.87, and the provincial utilized grade was improved by an average of 0.83. After converting the provincial grade into national grade, the national natural quality grade was improved by an average of 0.53, and the national utilized grade was improved by an average of 0.73. The new ideas and methods of prediction of cultivated land quality potential were explored. The results provided guidelines for the evaluation of cultivated land potential and the selection of index system, and provided the reference for quality evaluation of cultivated land.

Key words: potential of cultivated land quality; matter element analysis; reformed factor combination; Zhuozhou City; land consolidation

0 引言

土地整治,特别是耕地整治在保证中国粮食安全和实现耕地总量动态平衡等方面起到了巨大作用^[1]。土地整治潜力评价是编制土地整治规划的重要前提和基础,对确定区域土地整治的目标与方针、划定土地整治区和指导区域土地整治活动等具有重要的意义^[2-5]。2016年12月23日国务院批复的《全国土地整治规划(2016—2020年)》中提出了“十三五”时期全国经过土地整治的基本农田质量平均提高1个等级,全面提升耕地数量质量保护,落实最严格的耕地保护制度,开展农田基础设施建设,努力补充优质耕地^[6]。由此可见,耕地整治质量潜力测算是新时期、新规划下开展土地整治的重点研究内容之一。

国外已有研究成果对耕地整治质量潜力进行了探索,为耕地质量潜力评价提供了借鉴。国外土地整治历史可追溯到18世纪,并且积累了丰富的经验,其中德国在土地整治技术方面具有领先地位,早在20世纪80年代已普遍应用计算机数据处理技术建立土地整治信息系统(LE-GIS),并且能运用GIS技术对整治前后的地块价值进行评估,其指标体系构建重点考虑社会、经济和环境等多个方面,通过采用指标评价法和应用GIS对土地景观结构在某种程度上受到土地整治的影响研究,表明不同的时空尺度下土地景观结构与土地整治工程的联系^[7-9]。我国土地整治虽起步较晚,但相关学者也进行了大量研究,从研究思路上看,起初只是对耕地整理潜力测算进行简单的研究探索^[10-11],其中主要代表是基于省级农用地分等数据,采用农用地分等自然质量参评因素及权重进行土地整治质量评价^[12],随后出现了在农用地分等计算体系中,通过甄别敏感因素及稳定因素,增加自然质量和利用水平修正因素,并以此建立新的质量评价指标体系^[13-14];从研究方法上看,主要包括耕地质量指数加权法、最高等别法、耕地产能评价法、修正法、预评价法、熵权法、因素组合

法^[15-20]、热点分析法等^[21-23]。

综合分析国内外研究进展可知,现阶段,土地整治工程在田块平整、田间道路、农田林网兴建等改善农田生产环境等方面所起的作用日益突出^[24]。如何开展促进地区经济发展、缩小城乡差距、增加农民收入、保护和改善农业生产生活环境的综合整治已成为研究的焦点。但相关领域始终没有一套灵活、适用性广泛的评价方法和指标体系,且基于潜力计算方面的分析评价方法较少,传统的因素组合法只考虑了得分低于目标值的因素,并未考虑其可改造程度,导致组合计算过程繁琐且对结果判定造成了干扰。并且修正的评价体系无法揭示土地整治工程提升耕地质量等别的变化情况,测算结果往往夸大了土地整治措施对耕地质量潜力提升的能力。

本文针对上述研究方法的不足,提出改进的因素组合法,通过建立一套可改造因素组合判断流程,找出符合研究区实际情况的可改造限制因素,进而测算出耕地自然质量潜力;其次,利用物元分析模型对构建的土地利用系数评价指标进行关联度计算,最后测算出耕地利用质量潜力,从而指导土地整治规划,为最终实现耕地质量提升提供技术支持。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

涿州市地处河北平原北部,太行山东麓平原,地理位置为115°44′~116°15′E、39°21′~39°36′N。地质构造属太行山山洪冲积扇,结构稳定地形平坦。境内地形总体特征是西高东低,全境地处太行山前倾斜区,由西北向东南倾斜,最高海拔69.4m,最低海拔19.8m,地面坡降1/660左右。地貌形态受拒马河冲积影响,南北各有二级阶地,高差2~4m不等。属暖温带半湿润季风区,大陆性季风气候特点显著,温差变化大,四季分明,年平均温度11.5℃,年平均降水量547.3mm。市内河流较多,辖区内有永定河、白沟河、小清河、琉璃河、北拒马河、胡良河等,属海河流域,大清河水系。近年来地下水位持续

下降,降水量减少,河内常年无水,区内大部分灌溉设施老旧。

涿州市也是河北省耕地质量等别监测评价所选的重点监测区域之一,全县总面积 75 127.85 hm²,农用地 53 046.39 hm²(其中耕地 43 986.51 hm²,园地 2 016.53 hm²,林地 4 373.31 hm²,其他农用地 2 670.04 hm²)。涿州市 2013 年度耕地质量等别年度更新结果显示,全市耕地共分为 8 个国家级自然质量等别,分别为 8~15 等,其中水田 452.53 hm²、水浇地 35 739.62 hm²、旱地 7 959.73 hm²。涿州市耕地自然质量等别及位置图如图 1 所示。

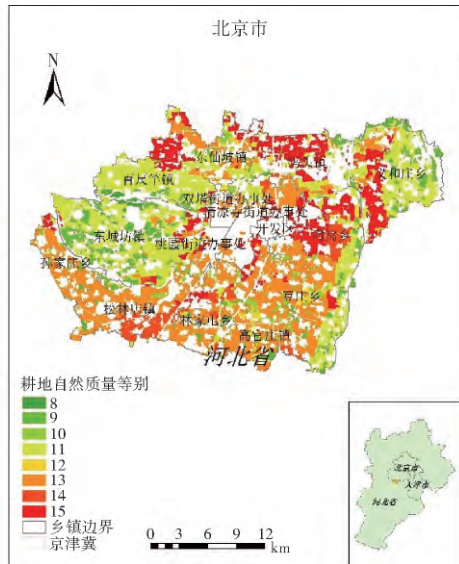


图 1 涿州市耕地自然质量等别及位置图

Fig. 1 Cultivated land natural quality and location map of Zhuozhou City

1.2 数据来源

数据主要包括涿州市 2013 年 1:10 000 耕地质

量等别成果数据、2011 年 1:10 000 土地利用现状数据以及涿州市 GDEM V2 30 m 分辨率数字高程数据。另外,辅助资料还包括《涿州市土地利用总体规划(2010—2020 年)》、《河北省涿州市 2013 年度耕地质量等别年度更新评价分析报告》、涿州市行政区划图、林业部门统计数据等。

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

首先选取适当尺度的网格,将耕地分等单元和土地利用矢量数据网格化成基础数据库,并结合 GB/T 28407—2012《农用地质量分等规程》(以下简称《规程》^[25]),利用改进的因素组合法,分析涿州市土地整治可改造耕地自然质量限制因素^[26-28],并对可改造限制因素通过定性分析后进行等级提升,得到提升后的自然等指数以及自然质量潜力。然后,根据选取的指标因子构建土地利用系数指标体系,采用层次分析法(Alytic hierarchy process, AHP)^[29]赋予权重,计算整治前每个网格的土地利用系数。最后通过物元分析法找出利用水平较低的区域并提升相对应的指标值得分,计算整治后每个网格的利用系数和整治后的利用等指数,进而根据整治前后利用等指数的差值计算出耕地利用质量潜力。具体分析流程见图 2。

2.2 自然质量潜力测算方法

传统的因素组合法大都直接对农用地分等因素进行全因素组合,然而该方法忽略了因素的可改造程度,不仅导致计算量大,组合过程复杂化,且对评价结果造成了干扰。根据 TD/T 1013—2013《土地

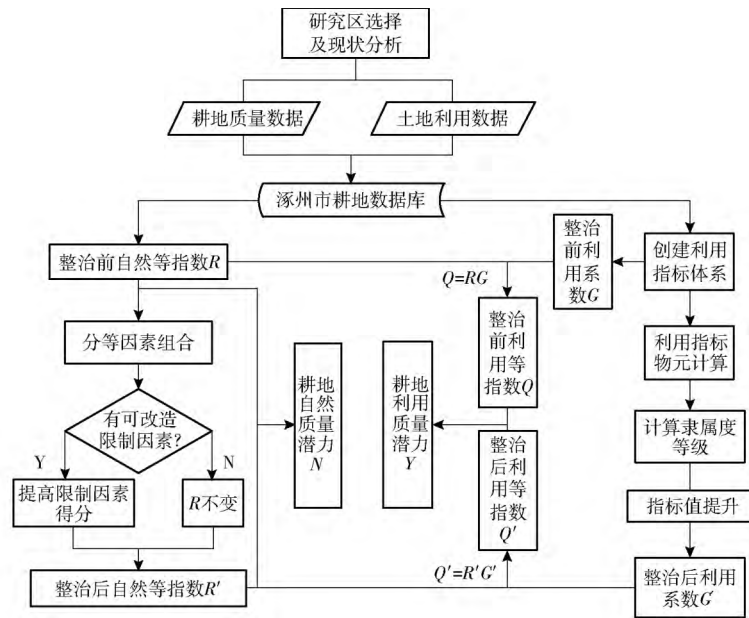


图 2 研究流程图

Fig. 2 Flow chart of study

整治项目验收规程》可知,有效土层厚度、盐渍化程度、土壤有机质含量、土壤 pH 值、表层土壤质地、排水条件和灌溉保证率是耕地整治质量验收内容,经过土地整治工程后,其属性可以发生突变^[30-31],其余分等因素在整治过程中,都是在资金、技术现状以及生态环境保护背景下,近期开发难度大,生态环境破坏严重,并且不适合大面积推广。以此为理论基础,将上述 7 种因素确定为土地整治可改造因素,然后在此基础上进行因素组合寻找限制因素。

2.2.1 可改造因素组合

根据涿州市 2013 年度耕地质量等别补充完善成果可知,涿州市耕地质量分等因素包括 4 个:灌溉保证率、表层土壤质地、土壤有机质含量、剖面构型,

分别有 4、3、5、7 个分级水平(表 1),其中可改造因素有 3 个。将农用地分等单元可改造因素得分用相应的代码表示,因素得分(10~100 分)分别对应 1、2、3、4、5、6、7、8、9、+ 这 10 个代码,然后按照表 1 中分等因素的顺序把 3 个因素得分代码合并到一起,作为自然质量评价单元可改造因素组合类型标识。例如某评价单元可改造因素组合类型标识为“398”,则说明该单元灌溉保证率得分为 30 分,对应无灌溉条件,表层土壤质地得分为 90 分,对应表层土壤以粘土为主,土壤有机质质量分数得分为 80 分,对应有机质质量分数大于 2%,以此类推得到所有评价单元的 3 个因素的全部组合类型。

表 1 涿州市农用地分等因素及其分级分值

Tab.1 Arable land grading indicators and their classification and scores in Zhuozhou City

因素分值	因素分值 代码	灌溉保证率	表层土壤 质地	土壤有机质 质量分数/%	剖面构型
100	+	充分满足	壤土		通体壤,壤/粘/壤
90	9	基本满足	粘土		壤/粘/粘,壤/砂/壤,砂/粘/粘
80	8			>2.0	粘/砂/粘,通体粘
70	7	一般满足	砂土		砂/粘/砂
60	6			1.5~2.0	壤/砂/砂,浅位粘
50	5			1.0~1.5	粘/砂/砂
40	4			0.6~1.0	通体砂,通体砾
30	3	无灌溉条件			
20	2			<0.6	
10	1				

2.2.2 限制因素组合

由于作物生长取决于生活环境对其最适生长环境因素值的满足程度(本文用因素得分标识),满足程度小的则是影响作物生长的主要限制因素,也是影响农用地生产能力发挥的主要原因。满足程度最小的为第一限制因素,即最大限制因素,次之为第二限制因素,依次类推^[32]。根据这一原则和表 1 分级分值标准,分等因素得分在 50 及以下时,该因素就会对作物生长有主要限制作用。如土壤有机质质量分数小于 0.6%(即有机质得分 20 分)属于养分贫瘠;表层土壤质地为砾质土、土壤重度以上盐渍化、无灌溉排水条件已严重影响农用地耕作。因此将分等因素得分在 10~50 分(标识代码为 1、2、3、4、5)之间的视为限制因素,然后再从上述可改造因素组合中筛选出包含限制因素的组合确定为可改造限制因素组合类型,以此作为本文的研究对象。

2.2.3 自然质量潜力测算

根据各指定作物的光温生产潜力指数和产量比系数,结合指定作物的分等因素权重、因素指标分值,按照《规程》计算整治前自然质量等指数。然

后,结合研究区实际,综合运用 GIS、遥感等定性定量方法分析自然质量评价因素中可改造限制因素及其改造程度,对整治后耕地自然质量进行重新评价,得到整治后自然等指数,最后根据整治前后自然等指数差值获取耕地整治自然质量潜力,计算公式为

$$R_{ij} = \sum_{j=1}^s a_{ij} \left(\sum_{k=1}^r w_k f_k / 10\,000 \right) \beta_j \quad (1)$$

$$R'_{ij} = \sum_{j=1}^s a'_{ij} \left(\sum_{k=1}^r w_k f'_k / 10\,000 \right) \beta_j \quad (2)$$

$$R_i = R'_{ij} - R_{ij} \quad (3)$$

式中 k ——分等因素编号 s ——指定作物数量
 r ——分等因素的个数

w_k ——第 k 个分等因素的权重

β_j ——第 j 种作物的产量比系数

a_{ij} ——第 j 种作物的光温生产潜力指数

f_k, f'_k ——整治前、后可改造限制因素对应的指标分值

R_{ij}, R'_{ij}, R_i ——第 i 单元第 j 种指定作物整治前、后的自然质量等指数和自然质量潜力

2.3 利用质量潜力测算方法

2.3.1 土地利用系数计算

农用地分等因素只考虑了土壤立地条件以及灌溉基础设施等影响因素,未充分认识到土地整治工程措施对耕地生产条件改善等方面带来的影响,也就是《规程》中所提到的土地利用系数,同时还忽略了绿色生态建设、“田水路林村”全域综合整治的重要意义。因此本文结合已有土地整治工程对耕地利用质量的影响,从耕地空间格局、耕作便利水平、田间基础设施 3 个因素层出发,补充耕地面积比、田块方度指数、集中连片度、道路通达度、耕作便利度、田间道路密度、田间沟渠密度、防护林比率等 8 个耕地整治可改造的生产环境条件因素,构建基于耕地生产条件可改善和综合考虑生产、生活、生态作用的土

地利用系数指标体系(表 2),以此来修订已有土地利用系数。以网格为评价单元^[33],以耕地自然等指数为基础,应用 AHP 法并通过一致性检验,经多位专家综合论证后确定各指标分级标准、得分及权重,加权修正得到新的土地利用系数,计算公式为

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij}w_{ij}}{100} \tag{4}$$

式中 m ——指标体系包含的指标个数
 G_i ——第 i 个网格单元的土地利用系数
 w_{ij} ——第 i 个网格内第 j 个土地利用系数指标对应的权重
 f_{ij} ——第 i 个网格内第 j 个土地利用系数指标对应的分值(10 ~ 100 分之间)

表 2 基于耕地生产条件可改善的土地利用系数指标体系及计算方法

Tab.2 Indicators and their weights of cultivated land utilization level in Zhuozhou City

目标层 T	因素层 F	指标层 I	计算公式	备注	指标取向
土地利用系数	耕地空间格局 $F_1(0.47)$	耕地面积比 $I_1(0.333)$	$I_1 = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij}}{A}$	S_{ij} 是网格内每块耕地图斑面积 A 为网格面积	+
		田块平均方度指数 $I_2(0.167)$	$I_2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n L_{ij}}{4 \sqrt{S_{ij}}} \right] / n$	n, L_{ij} 为网格内田块数量和每块田块周长 I_2 为 1 时,田块为正方形,值越大田块形状越复杂	-
		耕地集中连片度 $I_3(0.5)$	$I_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_i a_k w_{ik}}{S^2}$	反映田块集中连片性程度,值越大,连片性越高 a_i, a_k, w_{ik} 分别为 i 和 k 田块的面积、两者之间的距离权重	+
	耕作便利水平 $F_2(0.24)$	道路通达度 $I_4(0.5)$	$I_4 = \sum_{j=1}^n D_j / n$	D_j 为网格内每块田块到邻近公路的距离	-
		耕作便利度 $I_5(0.5)$	$I_5 = h_i / n$	h_i 为网格内田间道路直接通达的田块数	+
	田间基础设施水平 $F_3(0.29)$	道路密度 $I_6(0.375)$	$I_6 = \frac{\sum_{j=1}^n L_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}$	L_{ij} 为网格内每条农村道路的长度	+
		沟渠密度 $I_7(0.5)$	$I_7 = \frac{\sum_{j=1}^n H_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}$	H_{ij} 为网格内每条沟渠的长度,在一定范围内,密度越大,水系越发达,灌溉保证率越高	+
		防护林比率 $I_8(0.125)$	$I_8 = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}$	p_{ij} 为网格内每块防护林的面积	+

注: 指标取向“+”表示指标层的指标值越大则综合评价分值越大,“-”则反之。

2.3.2 物元分析法

物元分析是在处理某些条件下,用通常的方法无法达到预期目标的不相容问题的一种分析方法。在物元分析中,所描述的事物 M 及其特征 C 和量值 X 组成物元 R ^[34],其表达式为

$$R = (M, C, X) \tag{5}$$

如果事物有多个特征,则其表达式为

$$R_o = \begin{bmatrix} C_1 & X_1 \\ M_o & \vdots \\ & \vdots \\ C_n & X_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

本文对土地利用系数指标体系中各指标值进行物元分析,依次确定物元矩阵、经典域对象物元矩

阵、节域对象物元矩阵,最后计算关联函数确定隶属度并根据隶属度高低划分等级,等级低的地区表示相应指标值较低。根据等级分布情况,对低等级分布区域进行分析并提出相应的土地整治建议。具体计算过程为

$$R_p = \begin{bmatrix} C_1 & [a_{p1} & b_{p1}] \\ M_p & \vdots \\ & \vdots \\ C_n & [a_{pn} & b_{pn}] \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} C_1 & [a_{B1} & b_{B1}] \\ B & \vdots \\ & \vdots \\ C_n & [a_{Bn} & b_{Bn}] \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$K_j(X_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(X, X_0)}{|X_0|} & (X \in X_0) \\ \frac{\rho(X, X_0)}{\rho(X, X_1) - \rho(X, X_0)} & (X \notin X_0) \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho(X, X_0) = \left| X - \frac{1}{2}(a+b) \right| - \frac{1}{2}(b-a) \quad (10)$$

$$K_j(M_i) = \sum_{i=1}^n W_i K_j(X_i) \quad (11)$$

式中 W_i ——对应指标 C_i 的权重

a, b ——事物每个属性的最小值和最大值

$\rho(X, X_1)$ ——点 X 与待判物元 R 的节域区间的距

$\rho(X, X_0)$ ——点 X 与待判物元 R 的经典域区间的距

R_o, R_p, R_B ——待判物元矩阵、经典域矩阵和节域物元矩阵

M_o, M_p, B ——待判事物名称、评价等级、评价等级的全体

$K_j(X_i)$ ——待判物元 R 各指标关于各评价等级 j 的归属程度, 并以此数值的大小来确定该物元的等级, 关联函数的值域为 $(-\infty, +\infty)$, 若 $K_j(X_i) = \max K_j(X_i) (j=1, 2, \dots, m)$, 则待判物元第 i 个指标隶属于等级 j

$K_j(M_i)$ ——土地利用系数指标单元关于等级 j 的综合关联度, 若 $K_j(M_i) = \max K_j(M_i) (j=1, 2, \dots, m)$, 则 M_i 属于等级 j

2.3.3 利用质量潜力测算

以整治前后耕地利用等指数的差值来表示耕地整治利用质量潜力。即通过 2.2.3 节和 2.3.1 节中计算出的自然质量等指数和土地利用系数, 得到整治前利用等指数, 其计算方法参考《规程》。然后, 经过物元模型计算得到利用系数低等级分布区, 并结合研究区实际, 对隶属度级别为 2、3 的单元保持不变(1 级利用系数最低, 3 级最高, 2 级次之), 对级别为 1 的评价单元, 结合缓冲区分析、坡度分析、已有耕地整治项目经验等分析结果进行相应的等级提升, 重新计算整治后的土地利用系数, 进而得到整治后耕地利用等指数。最后根据整治前后利用等指数差值获取耕地整治利用质量潜力, 即

$$Y_i = G_i R'_{ij} - G_i R_{ij} \quad (12)$$

式中 Y_i ——第 i 个网格单元耕地利用质量潜力

G_i ——整治后土地利用系数

3 结果与分析

3.1 数据预处理

研究区采用 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 进行网格划分。采用 ArcGIS 软件中的 FishNet 工具创建网格, 并经过空间连接和空间叠加后, 建立网格与耕地、线状地物等多源数据的空间关系, 为评价指标的网格化计算做准备, 研究区共划分为 4 338 个网格单元, 如图 3 所示。

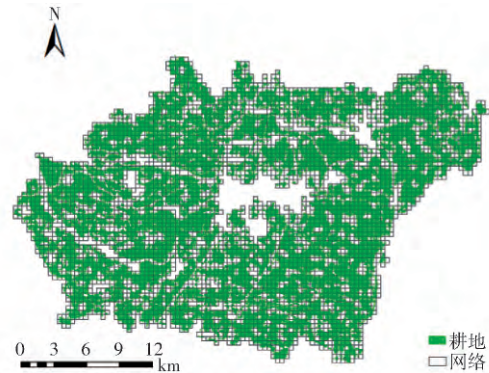


图3 涿州市耕地质量潜力评价网格单元

Fig. 3 Potential evaluation grid of cultivated land quality of Zhuozhou City

3.2 自然质量潜力

3.2.1 可改造限制因素组合

理论上, 涿州市农用地分等单元的可改造因素组合类型应是 3 个因素不同水平组合成的 60 种。经汇总分析发现, 可改造因素的全因素组合类型实际只有 19 种, 其中符合条件的限制因素组合类型有 8 种(3+6、3+8、375、376、378、396、398、775), 其分布如图 4 所示。

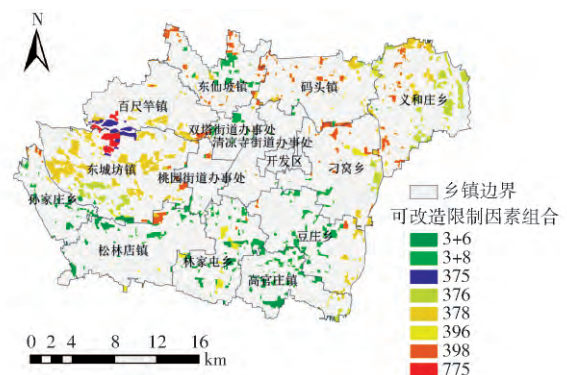


图4 可改造限制因素组合类型分布

Fig. 4 Convertible restriction factor combination type distribution

由图 4 可知, 涿州市耕地可改造限制因素组合的分布较为零散, 其 8 种组合中有 6 种属于灌溉保证率单限制因素, 1 种属于土壤有机质含量单限制因素(图中红色区域), 1 种属于“灌溉保证率+土壤有机质含量”双限制因素, 双限制因素集中分布在

百尺竿镇和东城坊镇交界处,且面积相对较小(图中紫色区域)。因此可得出结论,涿州市耕地自然条件大都受制于灌溉保证率和有机质含量这两个限制因素的影响,且灌溉保证率是其主导限制因素,全域均受到不同程度的影响,土地整治工程应对其进行重点关注。

3.2.2 潜力测算及分级

通过 ArcMap 的叠加分析工具,将可改造限制因素单元与非限制因素单元图层进行叠加对比分析可知,灌溉保证率限制因素在百尺竿镇、东城坊镇、双塔街道、义和庄乡 4 个地区 90% 的耕地均为一般满足,即因素分值代码为 7,而其他 11 个乡镇对应的灌溉保证率大都为基本满足,即因素分值代码为 9。据此对以上百尺竿等 4 个乡镇内的灌溉保证率限制因素得分从代码 3 提升到 7,即提高 1 个等级;松林店镇等 11 个乡镇从 3 提升到 9,即提高 2 个等级;有机质限制因素分布较为集中,且面积相对较小,其周围耕地的有机质含量均高于 20%,即高出 1 个等级,因此可借鉴其他乡镇近年来肥力提升效果显著的经验,如通过使用无污染有机肥,提升村民绿色种植观念,采用深松浅翻、深施肥料、粮豆轮作套作的保护性耕作制度、农家肥等培肥措施使其提高 1 个等级。

按照 2.2.3 节相关公式计算整治前后全市耕地自然等指数及提升潜力,提升前后部分因素组合类型及自然等指数如表 3 所示。平均自然等指数从之前的 1 378 ~ 2 521 变为 1 851 ~ 2 521,自然等指数平均提升 174,即 0.87 个省自然等级。国家自然等指

数平均提升 211,即 0.53 个国家自然等级。

按照自然间断点分级法划分等级,结果如图 5,其中 1 级表示自然等指数潜力区间为 0 ~ 90,2 级为 90 ~ 275,3 级为 275 ~ 473。涿州市土地整治自然质量潜力高值区集中分布在西部、东北部,少量分布在北部和南部,涉及到的乡镇主要有东城坊镇、百尺竿镇、义和庄乡、东仙坡镇、码头镇、林家屯乡、高官庄镇。其余地区提升潜力较低,且分布零散,可针对性的对灌排等老旧基础设施进行改善,通过资金投入和更新灌排设施,采取节水灌溉,南水北调,提高农民绿色种植意识,鼓励使用有机肥等措施进行改善。

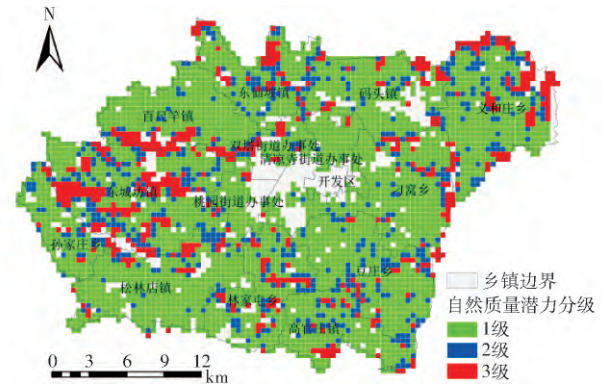


图 5 自然质量潜力分布
Fig. 5 Natural quality potential distribution

3.3 利用质量潜力

3.3.1 物元分析计算

首先按照式(4)计算整治前土地利用系数,然后对耕地空间格局、耕作便利水平、田间基础设施这 3 类指标进行物元分析计算,经典域矩阵的 3 个等级分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,节域矩阵为 H ,具体为

$$R_1 = M_1 \begin{bmatrix} [I_1 & 0.06 & 0.43] \\ [I_2 & 1.16 & 1.36] \\ [I_3 & 0.28 & 70.32] \\ [I_4 & 0 & 3.9] \\ [I_5 & 0 & 0.02] \\ [I_6 & 0 & 3.62] \\ [I_7 & 0 & 0.1] \\ [I_8 & 0 & 0.08] \end{bmatrix}$$
$$R_2 = M_2 \begin{bmatrix} [I_1 & 0.43 & 0.76] \\ [I_2 & 1 & 1.16] \\ [I_3 & 70.32 & 163.16] \\ [I_4 & 3.9 & 7.56] \\ [I_5 & 0.02 & 0.09] \\ [I_6 & 3.62 & 7.88] \\ [I_7 & 0.1 & 3.6] \\ [I_8 & 0.08 & 0.76] \end{bmatrix}$$

表 3 整治前后可改造限制因素组合及自然等指数
Tab.3 Convertible restriction factor combination and physical quality grade index before and after land consolidation

整治前		整治后		提升因素
可改造限制因素组合	自然等指数	可改造限制因素组合	自然等指数	
3 + 6	1 577	7 + 6	1 980	灌溉保证率
3 + 6	1 577	9 + 6	2 190	灌溉保证率
3 + 8	1 642	7 + 8	2 050	灌溉保证率
3 + 8	1 642	9 + 8	2 255	灌溉保证率
375	1 642	775	1 787	灌溉保证率
375	1 642	975	2 040	灌溉保证率
376	1 443	776	1 851	灌溉保证率
376	1 443	976	2 088	灌溉保证率
378	1 507	778	1 916	灌溉保证率
378	1 507	978	2 120	灌溉保证率
396	1 779	796	2 187	灌溉保证率
396	1 779	996	2 392	灌溉保证率
398	1 843	798	2 252	灌溉保证率
398	1 843	998	2 456	灌溉保证率
375	1 642	376	1 443	有机质含量
775	1 787	776	1 851	有机质含量

$$R_3 = M_3 \begin{bmatrix} [I_1 & 0.76 & 1] \\ [I_2 & 0.99 & 1] \\ [I_3 & 163.16 & 256] \\ [I_4 & 7.56 & 18] \\ [I_5 & 0.09 & 130.46] \\ [I_6 & 7.88 & 18.6] \\ [I_7 & 3.6 & 47.6] \\ [I_8 & 0.76 & 0.92] \end{bmatrix}$$

$$R_H = H \begin{bmatrix} [I_1 & 0.06 & 1] \\ [I_2 & 0.99 & 1.36] \\ [I_3 & 0.28 & 256.01] \\ [I_4 & 0 & 18] \\ [I_5 & 0 & 130.45] \\ [I_6 & 0 & 18.6] \\ [I_7 & 0 & 47.35] \\ [I_8 & 0 & 0.92] \end{bmatrix}$$

物元分析等级划分可视化结果如图6所示,其中1级代表低值区域,3级代表高值区域,可见涿州市耕地空间格局和便利水平基本满足要求,着重对低值区域进行相应的整治工程。

空间格局物元分析如图6a,1级绿色区域综合关联度较低,表现为耕地占地面积较少,地块破碎,连片性差,这些地区建议进行土地平整与改造,增加有效耕地面积,归并零散地块,加强耕地集中连片性建设,使之达到“田成方”的效果。耕作便利水平物元分析如图6b,整体处于中低等水平,3级零散分布,1级绿色低值区表现为道路通达度低,田间道路分布较少,耕作不够便利,应对这些地区进行田间道路修建,损毁路面翻修,完善基础交通道路网覆盖,使之达到“路相通”的效果。田间基础设施物元分析如图6c,整体处于低等水平,实地调查发现这些地区沟渠设施老旧,输水管道等灌溉水利设施不足,少数地区发达,且防护林分布较少,难以起到强有力的防护功效,应着重加强水利设施兴建,营造绿色防护林,达到“渠相连、林成网”的高效生态农业。

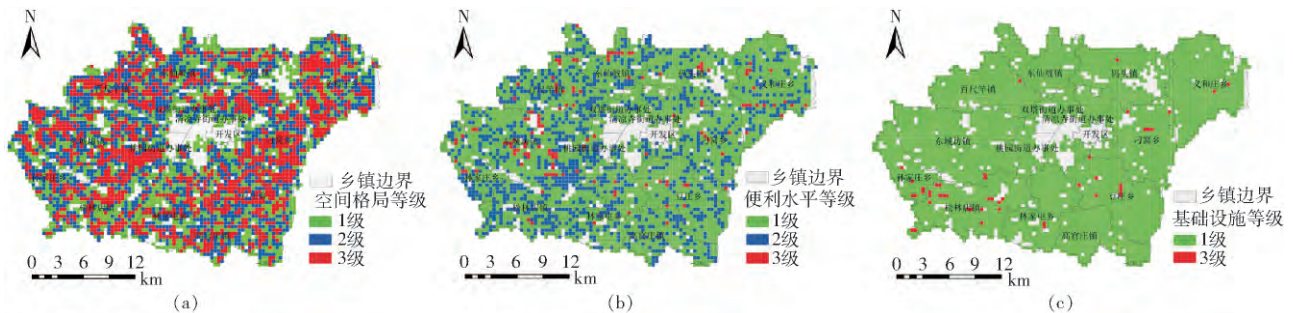


图6 物元分析结果

Fig.6 Results of matter element analysis

3.3.2 潜力测算及分级

按照式(4)计算土地利用系数 G_i ,结果介于0.1~0.72之间。借鉴已有土地整治工程项目对当地进行的改造,并结合现有的GIS、RS等技术,对上述低等级(1级)区域进行适当的土地整治工程,再按照式(4)计算整治后的土地利用系数 G'_i , G'_i 介于0.21~0.72之间,最后按式(12)计算利用质量潜力。整治后的利用等指数平均值从790.9提高为957.7,提高166.8,即0.83个等级。国家利用等指数平均提高145,即0.73个利用等。

通过耕地平整、田块归并、修建田间道路等工程可使耕地空间格局更加集中和连片,耕地空间形态均匀,越有利于集中连片生产耕作,所以方度指数提高2级,连片性提高1级;道路通达度表征了耕地距离运输公路的远近,它是耕作便利度的先决条件,只有将人力物力有保障的运输到田地,才能保证提高耕地利用水平,且结合实地调研可知道路等基础设施建设提升幅度较大,技术条件成熟,因此提高2级;耕作便利度表征的是田间道路通达的田块数量,此指标相对影响范围较小,因此提高1级;对基础设施因素层下的3个指标分别进行分析,通过对比高分二号遥感影像和实地调查,低值区内的道路和沟渠分布较少,且沟渠设施老旧,沟渠建设还需考虑水源、电力设施等分布;将防护林图层和耕地图层叠加分析可知,涿州市仅有少数乡镇设有防护林,经过耕地整治,各地区的防护林可以得到明显提升。具体提升方案如表4。

利用质量潜力分级结果如图7,其中1级表示利用等指数潜力区间为0~60,2级为60~162,3级为162~390。由图可见,涿州市耕地利用质量潜力高值区聚集在西部和东部,北部少量分布,主要包含孙家庄乡、松林店镇、东城坊镇、百尺竿镇、东仙坡镇、码头镇、义和庄乡、刁窝乡、豆庄乡,潜力低值区主要分布在南部,包括林家屯乡、高官庄镇以及豆庄乡中南部,可针对性的进行田块平整、补修破损道路、新建道路和沟渠完善路网和渠网密度,增加防护

表 4 分级方法与提升方案
Tab. 4 Classification method and lifting scheme

因素层	级别	耕地空间格局	网格个数	提升方案
耕地空间格局	1	0 ~ 0. 400 3	1 219	方度指数提高 2 级
	2	0. 400 3 ~ 0. 666 9	1 843	连片性提高 1 级
	3	≥ 0. 666 9	1 276	保持不变
耕作便利水平	1	0 ~ 0. 25	452	道路通达度提高 2 级
	2	0. 25 ~ 0. 4	331	耕作便利度提高 1 级
	3	≥ 0. 4	3 555	保持不变
田间基础设施	1	0 ~ 0. 2	3 116	道路密度提高 2 级
	2	0. 2 ~ 0. 362 5	739	沟渠密度提高 1 级
	3	≥ 0. 362 5	483	防护林密度提高 1 级

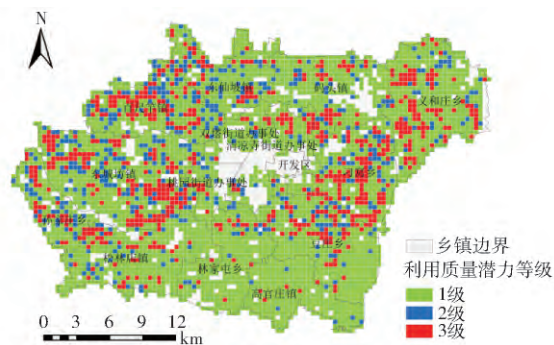


图 7 利用质量潜力分布

Fig. 7 Utilization quality potential distribution

林,完善田间电力、水利等基础设施。

4 结论

从耕地自然条件和利用条件两方面对影响耕地质量的因素进行分析,充分结合研究区的土地利用现状和耕地质量等别更新数据,通过改进的因素组合法合理高效的找出可改造限制因素,选取和当地生产利用水平息息相关的 8 个指标构建了土地利用系数指标体系,并引用物元分析法对其进行评价划分了高、中、低 3 个等级区,再根据各指标针对性的提出合理整治意见。

(1) 耕地自然质量和利用水平可以定性定量地评价耕地整治潜力大小,为土地整治潜力评价方面的研究提供了思路借鉴。

(2) 改进的因素组合法能够准确地找出涿州市自然质量可改造限制因素,克服了传统因素组合法对土地整治难以改进的分等因素的重复组合计算,提高了方法的适用范围,有助于明确整治工程方向;建立的土地利用系数指标体系综合考虑生产、生活、生态功能,评价更为全面客观;物元分析法对各指标进行综合关联度分析后,能够准确地划分各因素等级,找出低等级分布区,再结合最新的 GIS 等空间分析方法,能够很好地指导土地整治工程。

(3) 涿州市耕地整治潜力较大,自然质量潜力较高区域分布于东北和西部,耕地利用水平中等,利用质量潜力较高区域分布于西部、东部和北部,经改善后的国家自然等、国家利用等潜力均有所提升。

参 考 文 献

1 倪九派,李萍,魏朝富,等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业工程学报,2009,25(5):202-209.
NI Jiupai, LI Ping, WEI Chaofu, et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 202-209. (in Chinese)

2 王瑞生,高向军. 土地开发整理项目预算编制指南[M]. 北京:地质出版社,2002.

3 张一飞,黄劲松,沈秀峰,等. 以定级为基础的农用地整理潜力测算方法研究[J]. 地域研究与开发,2005,24(2):96-100.
ZHANG Yifei, HUANG Jinsong, SHEN Xiufeng, et al. Research on estimation of farmland rearrangement potential based on farmland classification[J]. Areal Research and Development, 2005, 24(2): 96-100. (in Chinese)

4 张瑞娟,姜广辉,周丁扬,等. 耕地整治质量潜力测算方法[J]. 农业工程学报,2013,29(14):238-244.
ZHANG Ruijuan, JIANG Guanghui, ZHOU Dingyang, et al. Calculation method of qualitative potential of farmland consolidation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 238-244. (in Chinese)

5 唐秀美,陈百明,张蕾娜,等. 中国耕地整理潜力测算分析[J]. 农业工程学报,2012,28(1):219-224.
TANG Xiumei, CHEN Baiming, ZHANG Leina, et al. Analysis of cultivated land consolidation potential in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 219-224. (in Chinese)

6 国务院批复《全国土地整治规划(2016—2020 年)》[J]. 城市规划通讯,2017(1):13.

7 CAY T, ISCAN F. Fuzzy expert system for land reallocation in land consolidation[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11055-11071.

8 MIRANDA D, CRECENTE R, ALVAREZ M F. Land consolidation in inland rural Galicia, N. W. Spain, since 1950: an example of the formulation and use of questions, criteria and indicators for evaluation of rural development policies[J]. Land Use Policy, 2006, 23(4): 511-520.

9 CAY T, UYAN M. Evaluation of reallocation criteria in land consolidation studies using the analytic hierarchy process (AHP)[J]. Land Use Policy, 2013, 30(1): 541-548.

10 闫东浩,侯森兴,朱德举,等. 耕地整理潜力测算[J]. 农业工程学报,2004,20(3):257-261.
YAN Donghao, HOU Senxing, ZHU Deju, et al. Estimation of cultivated land consolidation potential[J]. Transactions of the

- CSAE, 2004, 20(3): 257–261. (in Chinese)
- 11 高士光, 陈亚恒, 许峰. 基于农用地分等成果的耕地整理潜力计算方法——以衡水市桃城区为例[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 397–401.
GAO Shiguang, CHEN Yaheng, XU Hao. Calculational method study on cultivated land consolidation potential based on agricultural land classification achievement—a case study: Taocheng District, Hengshui City [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(1): 397–401. (in Chinese)
- 12 金晓斌, 张鸿辉, 周寅康. 农用地定级综合评价中权重系数确定方法探讨[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(4): 447–456.
JIN Xiaobin, ZHANG Honghui, ZHOU Yinkang. A study of weight making methods for agricultural land gradation evaluation [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2008, 44(4): 447–456. (in Chinese)
- 13 余建新, 魏巍, 廖晓虹. 等. 土地整治项目区农用地质量分等方法的修正[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 234–240.
YU Jianxin, WEI Wei, LIAO Xiaohong, et al. Modified method for gradation on agricultural land quality in land remediation project areas [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 234–240. (in Chinese)
- 14 徐康, 金晓斌, 吴定国. 等. 基于农用地分等修正的土地整治项目耕地质量评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 247–255.
XU Kang, JIN Xiaobin, WU Dingguo, et al. Cultivated land quality evaluation of land consolidation project based on agricultural land gradation [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 247–255. (in Chinese)
- 15 陈青锋, 于化龙, 张杰. 等. 耕地质量提升重点区域划定及可提升潜力研究——以河北省卢龙县为例[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(2): 221–229.
CHEN Qingfeng, YU Hualong, ZHANG Jie, et al. The study on the zoning and development potentials of the key areas of arable land improvement: a case study of Lulong County of Hebei Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(2): 221–229. (in Chinese)
- 16 马春艳, 王占岐, 易平. 基于 ArcGIS 的耕地整治潜力测算与分级研究——以湖北省房县为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 207–211.
MA Chunyan, WANG Zhanqi, YI Ping. Study on the potential calculation and classification of farmland remediation based on ArcGIS—a case study on Fangxian County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 207–211. (in Chinese)
- 17 张凤荣, 安萍莉, 王军艳. 等. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 71–75.
ZHANG Fengrong, AN Pingli, WANG Junyan, et al. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading [J]. Resources Science, 2002, 24(2): 71–75. (in Chinese)
- 18 郦文聚. 农用地分等及其应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
YUN Wenju. Agricultural land classification and its application [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 19 刘文智, 陈亚恒, 李新旺. 等. 基于产能的耕地整理数量质量潜力测算方法研究——以河北省卢龙县为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 227–231.
LIU Wenzhi, CHEN Yaheng, LI Xinwang, et al. Study on the quantitative and qualitative potential of farmland consolidation on production capacity—a case study on Lulong County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(3): 227–231. (in Chinese)
- 20 朱小娜. 耕地质量评价与潜力分区研究——以武汉市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
ZHU Xiaona. Research on the quality evaluation of cultivated land and the potential zoning [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 21 叶达, 吴克宁, 刘霏珈. 基于正态云模型与熵权法的景泰县耕地后备资源开发潜力评价[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6): 22–28.
YE Da, WU Kening, LIU Peijia. Developmental potentiality evaluation of cultivated land reserve in Jingtai based on normal cloud and entropy weight [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(6): 22–28. (in Chinese)
- 22 唐秀美, 潘瑜春, 刘玉. 等. 基于耕地系数和预评价法的耕地整治潜力测算方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 211–218.
TANG Xiumei, PAN Yuchun, LIU Yu, et al. Calculation method of cultivated land consolidation potential based on cultivated land coefficient and pre-evaluation of farmland classification [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 211–218. (in Chinese)
- 23 伍育鹏, 郦文聚, 邹如. 耕地产能核算模型的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 108–113.
WU Yupeng, YUN Wenju, ZOU Ru. Model for calculation of cultivated land productivity [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp. 2): 108–113. (in Chinese)
- 24 陈锦光, 梁健. 凤城市赛马镇土地整理取得阶段性成果[J]. 国土资源, 2013(10): 41.
- 25 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T28407—2012 农用地质量分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- 26 赵冬玲, 何珊珊, 杨建宇. 等. 基于限制因素和热点分析的耕地整治质量潜力测算[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 158–164. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170221&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.021.
ZHAO Dongling, HE Shanshan, YANG Jianyu, et al. Qualitative potential calculation of arable land consolidation based on limiting factors and hot spot analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 158–164. (in Chinese)

- 27 余述琼, 张蚌蚌, 相慧, 等. 基于因素组合的耕地质量等级监测样点布控方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 288–297.
YU Shuqiong, ZHANG Bangbang, XIANG Hui, et al. Layout method for monitoring sample point of arable land quality level based on combination of factors [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 288–297. (in Chinese)
- 28 郭力娜, 张凤荣, 曲衍波, 等. 基于分等因素组合的农用地整理类型分区[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 308–314.
GUO Li'na, ZHANG Fengrong, QU Yanbo, et al. Farmland consolidation type zoning based on combination of grading factors [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 308–314. (in Chinese)
- 29 肖波, 张建新, 温丽娟, 等. 基于层次分析法的吴江经济开发区土地集约利用潜力评价研究[J]. 世界科技研究与发展, 2009, 31(3): 542–545.
XIAO Bo, ZHANG Jianxin, WEN Lijuan, et al. Studies on the assessment for land use intensification potentiality of economic development zone in Wujiang [J]. WORLDSCI-TECH R&D, 2009, 31(3): 542–545. (in Chinese)
- 30 高星, 吴克宁, 陈学站, 等. 土地整治项目提升耕地质量可实现潜力测算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 233–240.
GAO Xing, WU Kening, CHEN Xuezheng, et al. Feasible potential of cultivated land quality promoted by land consolidation project [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 233–240. (in Chinese)
- 31 赵蕾, 谭荣建. 基于农用地分等的土地整理耕地质量评定方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(17): 4266–4270.
ZHAO Lei, TAN Rongjian. The method of assessing land quality of the implementation of land consolidation project based on agricultural land classification [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(17): 4266–4270. (in Chinese)
- 32 马建辉. 耕地质量等级监测成果应用方法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(10): 55–60.
MA Jianhui. Methods of monitoring cultivated land quality based on variation function and cultivated land gradation type [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(10): 55–60. (in Chinese)
- 33 沈立宏, 张超, 桑玲玲, 等. 利用网格法确定县域农田整治优先度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 241–247.
SHEN Lihong, ZHANG Chao, SANG Lingling, et al. Determination of consolidation priority for farmland at county level using grid method [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 241–247. (in Chinese)
- 34 王菲. 基于物元分析法的农村土地健康评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
WANG Fei. Evaluation of rural land health based on matter-element model [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)

(上接第289页)

- 35 SHIT P K, MAITI R. Rill hydraulics—an experimental study on gully basin in lateritic upland of paschimmedinipur, West Bengal, India [J]. Journal of Geography & Geology, 2012, 4(4): 1–11.
- 36 KIRKBY M J, MORGAN R P C. Soil erosion [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1980.
- 37 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 105–112.
LI Q, LIU G B, XU M X, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly loess plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 105–112. (in Chinese)
- 38 武红娟. 气候变化对甘肃黄土地区公路边坡侵蚀影响及防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
WU H J. Research on influence and control technique of road slope erosion caused by climate change in loess area in Gansu [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- 39 何东升. 延安地区土壤侵蚀与地质灾害相关性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
HE D S. Study on the relevance of soil erosion and geological disasters in Yan'an region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- 40 董瑞琨, 许兆义, 杨成永. 青藏高原冻融侵蚀动力特征研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 12–16.
DONG R K, XU Z Y, YANG C Y. Dynamic and character of freezing-thawing erosion on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 12–16. (in Chinese)
- 41 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. 中国水土保持, 2003(10): 17–18.
JING G C. Study on types of freeze-thaw erosion and its characteristics [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(10): 17–18. (in Chinese)
- 42 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 土类对正冻土成冰及冷生组构影响的实验研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 16–22.
WANG J C, XU X Z, ZHANG L X, et al. Experimental study of influence of soil type on ice formation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 16–22. (in Chinese)
- 43 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919–1925.
MU Y H, MA W, LI G Y, et al. Quantitative analysis of freeze-thaw cycle upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919–1925. (in Chinese)