

# 基于粗糙集的农田生态系统生产力及稳定性研究 ——以河北雄县为例

王庆宾, 王兴华, 许 皞, 门明新, 王树涛, 李新旺

(河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 生态系统生产力和生产力稳定性是两个不同的概念, 两者既相互影响又相互联系。在建立田块尺度耕地生产力空间稳定性的评价指标体系基础上, 采用粗糙集方法, 并结合 GIS 技术对河北省雄县耕地生产力及稳定性空间分布进行了分层次定量分析, 结果表明: 在不同生产力和生产力稳定性水平上, 影响因素存在较大变化。生产力方面, 雄县农田生态系统生产力空间波动的主控因素主要有排水条件、有机质、灌溉保证率、全氮、碱解氮和速效钾, 随着生产力的不断升高, 人为因素和自然因素对生产力的影响出现交替现象, 具体表现为: 生产力相对较低区人为因素和土壤自然属性共同作用, 生产力较高区人为因素占主导地位; 稳定性方面, 农田生态系统生产力稳定性空间波动的主控因素有全氮、土体构型、盐渍化情况和有机质含量, 在不同水平上主控因素对生产力稳定性的影响程度亦不相同, 人为作用对雄县农田生态系统生产力稳定性的影响较大, 土壤自然属性因素在中等稳定程度与人为因素相当。

**关键词:** 农田生态系统; 生产力; 稳定性; 粗糙集; 雄县

中图分类号: F323.211

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0212-08

## Study on Agro-ecosystem Productivity and Productivity Stability Base on Rough Set Method

—A Case Study in Xiongxin County

WANG Qing-bin, WANG Xing-hua, XU Hao, MEN Ming-xin, WANG Shu-tao, LI Xin-wang  
(College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

**Abstract:** The stability of ecosystem productivity and productivity are two different concepts, namely, they interact with each other. Based on the construction of the stability of territorial farmland system with full scale, the rough set method, and a collection of GIS technology, quantitative analysis in the spatial distribution of productivity and stability of Xiongxin county, Hebei province was carried out. The results show that there is a big change of factors at different levels of the stability of ecosystem productivity and productivity. In the matter of productivity, the main factors controlling fluctuations of farmland ecosystem productivity in Xiongxin county is drainage conditions, soil organic matter, irrigation guarantee rate, soil total nitrogen, available nitrogen and potassium. Human factors and natural factors impacting on the productivity of the phenomenon appear alternately with the productivity rising. Human factors and the natural properties of soil are interacting in relatively low productivity areas and human factors are dominant in higher productivity areas. In the matter of stability of productivity, the stability of agro-ecosystem productivity controlling factors of space fluctuations are mainly nitrogen, soil configuration, saline conditions and organic matter. Controlling factors at different levels on the stability of the impact on productivity is not the same. Overall, the human role in stability of farmland ecosystem productivity of the Xiongxin county is the largest and natural properties of soil stability factor in the middle level is comparative with the human factors.

**Key words:** agro-ecosystem; productivity; stability; rough set; Xiongxin county

收稿日期: 2010-04-09

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121107); 河北省农用地综合产能调查和评价

作者简介: 王庆宾(1984-), 男, 河北省沙河市人, 在读硕士研究生, 从事土地评价和土地资源利用工作。E-mail: wqb198443@163.com

通信作者: 许皞(1963-), 男, 河北省定兴县人, 教授, 研究方向为土地资源管理。E-mail: xuhao22003@yahoo.com.cn

系统生产力是农田生态系统的主要功能之一<sup>[1-2]</sup>, 是生态系统本质特征的重要指标, 长期以来一直是生态学、农学等学科的一个重要研究领域, 也是构建多目标协调的农田生态系统优化模式的根本切入点<sup>[3-4]</sup>。土地资源是农田生态系统的重要物质基础, 土地(耕地)生产力的 高低不仅对粮食生产产生影响, 而且对农田生态系统生产力和稳定性有着重要的作用。

系统稳定性的概念来自于系统控制论, 一般指系统受到外界干扰后, 系统的偏差量(状态偏离平衡位置的数值)过渡过程的收敛性。20 世纪 50 年代初先后由植物生态学家 MacArthur<sup>[5]</sup> 和动物生态学家 Elton<sup>[6]</sup> 首先提出生态系统稳定性理论, 一直到 20 世纪 70 年代初期, Garde 和 Ashby<sup>[7]</sup> 应用数学模型研究了生态系统的稳定性后提出相反的结论, 他们认为生态系统的复杂性导致了不稳定性, May<sup>[8]</sup> 进一步扩充和完善了这个结论其后 Goodman<sup>[9]</sup> 和 Pimml<sup>[10]</sup> 指出生态系统多样性和稳定性之间并不存在着简单的相关关系。有关实验的证据也有两种不同的结果, 一种结果支持多样性导致稳定性的理论<sup>[11-14]</sup>; 另一种结果则倾向于否定<sup>[15-18]</sup>。随着生态系统概念的讨论和延伸, 科学家从不同角度建立了多种评价指标体系和方法对生态系统进行了研究, 但当前在宏观大区域尺度研究上多限于某方面影响因素的分析, 在田块尺度上仍是通过实验研究某一因素或某种营养元素变化对生产力的影响, 且多数研究试验局限于田间小区定位观测, 以点代面的方式会造成对耕地生产力稳定性的评价结果的失真, 对指导生产决策依据不足; 微观与宏观指标相结合的研究还很少见。

本文在总结前人研究的基础上, 针对农田生态系统生产力稳定性研究的不足和难点问题, 以河北平原具有代表性的雄县作为研究对象, 宏观和微观相结合, 剔除短期内对生产力影响较小的一些因素, 建立了田块小尺度上的评价指标体系, 将农田生态系统生产力与生产力稳定性进行分层次研究, 旨在查清生产力空间波动和生产力稳定性空间波动之间的内在和外在联系, 探索农田生态系统生产力波动和生产力稳定性的主控因子, 为如何解决耕地生产力的稳定发展问题提供科学的参考依据, 对确保河北省平原区农田生态系统粮食高产稳产, 解决农田生态系统的可持续发展 and 粮食安全问题具有重大意义。

1 研究方法

1.1 耕地生产力空间波动评价指标

耕地生产力空间波动性综合反映了一个区域粮

食生产能力空间差异。空间波动特性受多种因素的影响, 在田块尺度上, 主要可分为: 土壤先决条件、人为易变因素、大环境以及偶然因素, 其中表土质地、剖面构型等土壤条件为不易改变性因素, 在较长时期内不会发生剧烈变化, 但其特征是影响粮食产量的重要因素; 随着科技的进步和经济的发展, 农田灌溉条件、有机质、施肥量等人为投入因素会发生很大变化, 沃土工程和测土配方施肥等工程的实施对反映了土壤养分对耕地地力的影响显著, 直接影响生产力高低水平; 此外, 气温、降雨量、地形地貌、科技进步、经济基础等因素在大范围内制约着粮食产量的变化趋势; 偶然性因素对粮食产量的影响不可忽略, 主要表现为人为性破坏和自然灾害等。鉴于以上分析, 本研究建立一个三层次的耕地生产力评价指标体系, 即目标层、基本指标层和原指标层, 来反映雄县耕地系统生产力空间波动状况(表 1)

表 1 耕地生产力及稳定性空间波动评价指标			
目标层	基本指标层	原指标层	指标编号
耕地生产力 及稳定性	土壤自然属性	表土质地	X <sub>1</sub>
		土体构型	X <sub>6</sub>
		pH	X <sub>11</sub>
		盐渍化情况	X <sub>3</sub>
	人为主导因素	灌溉保证率	X <sub>5</sub>
		排水条件	X <sub>2</sub>
		有机质	X <sub>4</sub>
	土壤养分含量	全氮	X <sub>7</sub>
		碱解氮	X <sub>8</sub>
		速效磷	X <sub>9</sub>
		速效钾	X <sub>10</sub>

1.2 指标量化

在选择 的 11 个指标中, 表土质地、土体构型、盐渍化情况、排水条件、灌溉保证率是地块属性的集中表现, 其中表土质地、土体构型和排水条件很难实现数值的量化, 农用地分等定级工作中采用质量分值的方法, 采用 0~ 100 分的封闭区间, 分值与指标的显著作用相对应, 本研究在进行野外调查和农户问卷时亦采用此方法对以上 4 个指标进行数值量化。

1.3 指标标准化

为了消除数量级和量纲的影响, 本文采用 Z-score 法对各指标进行标准化处理:

$$Z_i = \frac{X_i - X_0}{S} \quad (1)$$

式中:  $X_i$  ——原指标层指标的数据值;  $X_0$  ——标准差;  $Z_i$  ——原指标层指标标准化处理后的值。由于标准化处理后  $Z_i$  的值介于 - 3~ 3 之间, 为了消除标准化后可能带来的影响, 进行坐标平移:  $T_i = Z_i + 3$ 。

表 2 雄县耕地生产力主要指标数据、分值及描述

表土质地 (分值)	排水条件 (分值)	盐渍化 情况/ %	灌溉保证 率/ %	土体构型 (分值)
壤土 (90~ 100)	短涝 (90~ 100)	< 0. 2	无灌溉 ( < 30)	通体壤 ( - 100)
黏土 (70~ 90)	积水 (70~ 90))		基本满足 ( 30~ 70)	壤- 黏- 黏 ( - 90)
砂土 ( < 70)	积水 ( < 70)	0. 2~ 0. 4	一般满足 ( 70~ 90)	黏- 砂- 黏 ( - 80)
		0. 4~ 0. 6	充分满足 (90~ 100)	通体黏 ( - 70)
		> 0. 6		通体砂 ( - 40)

1. 4 耕地生产力及稳定性表征

以往的研究通常采用各种农作物的简单加和表示生产力大小, 并未考虑各种农作物之间供应能量的差异, 因此, 本文为了准确的表达雄县粮食生产能力, 利用标准粮产量表示雄县农田生态系统生产力, 有效地消除不同粮食作物由于包含能量不同对生产力产生的影响。设定基准作物为冬小麦, 其它粮食作物产量与冬小麦产量的比值称为产量比系数。计算公式如式(2)、式(3)。

α<sub>i</sub> = Q<sub>i</sub> / Q<sub>0</sub> (2)

G<sub>标</sub> = G<sub>0</sub> + G<sub>i</sub> / α<sub>i</sub> (3)

式中: α<sub>i</sub> ——各农作物之间的产量比系数; Q<sub>i</sub> ——区域农作物平均产量; Q<sub>0</sub> ——区域基准作物平均产量; G<sub>标</sub> ——地块标准量; G<sub>0</sub> ——地块基准作物产量; G<sub>i</sub> ——地块其他农作物产量。

采用变异系数来描述耕地生产力稳定性, 计算公式如式(4)。

δ = STDEV (G<sub>标</sub>) / G<sub>均</sub>

式中: δ ——变异系数; STDEV ——标准差; G<sub>均</sub> ——标准粮平均产量。

1. 5 耕地生产力波动性因素影响度定量方法

粗糙集(Rough Set)理论是波兰数学家 Z. Pawlak 提出的一种分析数据的数学工具, 该理论从新的视角对知识进行了定义, 把知识看作是知识论域的划分。目前, 它被广泛应用于人工智能、模式识别和知识数据库挖掘等领域。知识约简在粗糙集理论中是一个非常重要的概念, 它能够反映一个决策表的本质信息。众所周知, 知识库中的知识(属性)并不是同等重要的, 甚至有些属性是冗余的。我们不需要提供待处理数据以外的任何先验信息, 在保持知识数据库的分类和决策能力不变的条件下, 删除其中不相关或不重要的知识, 并能分析出剩余知识的重要程度, 可大大简化数据分析及为快速地科学决策提高支撑。

在粗集理论中, 对象的知识是通过指定对象的属性和它们的属性值来描述的。

定义 1 信息系统。粗集理论中的信息系统可用一个四元组来表示: S = {U, A, V, f}。其中 U 是一个非空集合, 表示数据库中的所有记录(Record); A 表示数据库中的全部属性(Attribute), 如果该信息表同时为决策表, 则在 A 中的属性可以进一步分为条件属性 C 和决策属性 D, A = C ∪ D; V 是属性值组成的集合; f 是属性和记录的函数, f(a, e) 的值确定记录 e 关于属性 a 的取值。

定义 2 等价类<sup>[19]</sup>。对于一个信息系统 S = {U, A, V, f} 中的的一个属性集合 B ⊆ A, 如果满足 IND(B) = {(x, y) ∈ U × U | a(x) = a(y)}, 任意 a ∈ B, 则称等价关系 IND(B) 为不分明关系(Indiscernibility Relation)。U/IND(B) 表示关系 IND(B) 上所有等价类的集合; B(x) 表示对象 x 所在的等价类。

定义 3 约简<sup>[19]</sup>。设 S = {U, A, V, f} 是一个信息系统, B ⊆ A, 且属性 a ∈ B, 若 IND(B) = IND(B - {a}), 则称属性 a 在族集 A 中是可省的(dispensable), 否则就是不可省的。若族集 A 中的每个关系 a 都是不可省的, 则称 R 是独立的(independent), 否则就是依赖的或非独立的。

进一步可定义, 若 Q ∈ P 是独立的, 并且 IND(Q) = IND(P), 则称 Q 是关系族集 P 的一个约简(reduce)。在族集 P 中所有不可省的关系的集合称为 P 的核(core), 以 core(P) 来表示。不难看出, P 有多个约简, 且 core(P) ∩ red(P), 其中 red(P) 是所有 P 的约简的族集。

定义 4 属性依赖度<sup>[20]</sup>。

R(B, D) = | POS<sub>B</sub>(D) / POS<sub>C</sub>(D) | (5)

式中: POS<sub>B</sub>(D) ——根据属性集合 B 划分的正区域; POS<sub>C</sub>(D) ——根据整个条件属性集 C 划分的正区域。

定义 5 属性重要度<sup>[20]</sup>。Sig(a, B, D) = R(B, D) - R(B - {a}, D), 其中 a 是属性集导出的划分的属性子集, Sig 值越大, 说明属性 a 对 C 的划分影响程度越高, 属性 a 的重要性越大。

在众多属性中要判断哪些属性重要与否, 只要考虑该属性从原属性集中删除后相应的分类是否改变, 若分类能力改变, 说明属性的重要性大; 反之重要性小。

2 研究区概况和数据来源

2. 1 研究区概况

雄县为河北省保定市辖县。地处北纬 38°55' - 39°10', 东经 116°01' - 116°20'。县内海拔高度为 6~

14 m, 平均 10.1 m。地势西部较高, 东部低洼。东西长 26 km, 南北宽 25 km, 总面积 52 400 hm<sup>2</sup>。地势平坦。属温带大陆性气候, 四季分明。县城面积近 10 km<sup>2</sup>, 常住人口 5 万余人。辖雄州、咎岗、大营、龙湾、朱各庄 5 镇, 米家务、双堂、张岗、北沙 4 乡, 223 个行政村, 199 个自然村。雄县农田水利实现了“两纲化”, 建立健全了县、乡、村三级科技推广服务组织, 先后被国家授予“全国水利先进县”、“全国科技推广先进县”、“全国农机监理先进单位”等荣誉称号。被农业部指定为“绿色食品红小豆生产基地县”。

2.2 数据来源

本研究选择整个雄县县域为研究对象, 鉴于研究方法的需要, 评价指标分为宏观和微观两个层次, 因此对传统的样点布置方法加以改进。采用网格法和叠加法相结合的方法进行布置。首先用 5×5 网格将整个雄县的农田进行划分, 每个网格内分布一个地块, 选取的农田样地均匀布设于全县范围; 其次采用土地利用现状图、土壤图和地形图 3 图叠加的方法, 在叠加区也就是不同类型区进行布设, 消除网格法造成的未考虑地形等影响因素产生的误差; 由于雄县地处平原地区, 排除了小地形对整个区域研究结果的影响, 所选农田地块均为水平地块, 由以上样点布置步骤所选取地块均为当地具有代表性的典型地块。宏观部分主要包括农户调研和统计数据两部分, 微观数据包括雄县第二次土壤调查土壤养分数据、雄县沃土工程土壤养分实验数据和实验田块多年定位实验数据 3 大部分。

3 雄县耕地生产力及稳定性空间分布规律

3.1 调查样点布置

将整个雄县的农田进行划分, 大约每 130 km<sup>2</sup> 的网格内分布有一个地块, 选取的农田样地均匀布设于全县范围。排除小地形对整个区域研究结果的影响,

共选取了 130 个深度样点, 选取地块均为当地具有代表性的典型地块。用 GPS 精确定位了每一个地块的经纬度坐标, 准确记录了地块户主的信息(如乡镇名、村名、户主名及其联系电话)。结合随机调查样点, 共将雄县分为 391 个地块, 覆盖整个雄县县域农田生态系统, 所选深度样点分布情况见图 1。

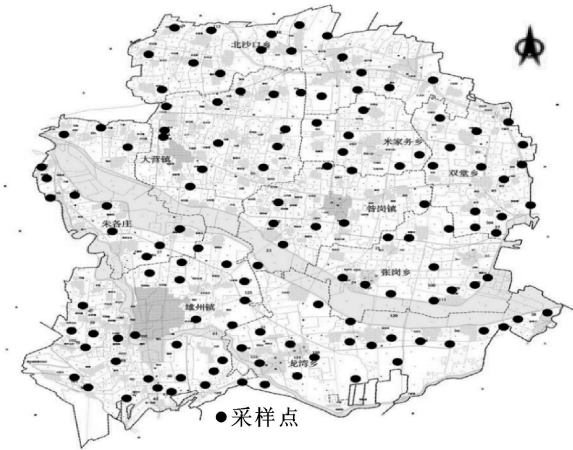


图 1 研究区及样点分布图

3.2 生产力和生产力稳定性级别划分

2005–2008 年雄县平均粮食(标准粮)产量在 6 000~13 500 kg/hm<sup>2</sup> 之间, 利用 SPSS 数理统计软件将雄县调查地块标准粮分为 4 类, 其中高产地块面积为 13 310.73 hm<sup>2</sup>, 占全县耕地总面积的 42.56%, 低产地块面积 5 918.92 hm<sup>2</sup>, 占 18.92%(表 3), 根据 2005 年、2006 年、2008 年定点调查数据, 以地块为单位计算雄县农田生态系统生产力空间变异系数, 经汇总统计可得雄县耕地系统生产力变异类型区的数量和空间分布规律(表 3), 1 类变异区([0, 0.10])面积分布最大为 9 722.28 hm<sup>2</sup>, 占雄县耕地总面积的 31.09%; 2 类变异区((0.10, 0.18]) 和 3 类变异区((0.18, 0.25]) 面积相当, 分别为 7 889.41 hm<sup>2</sup> 和 7 862.33 hm<sup>2</sup>, 占总面积的 25.23% 和 25.14%; 4 类变异区((0.25, 0.38]) 面积分布最小, 仅占耕地总面积的 18.54%。

表 3 雄县生产力和生产力稳定性面积统计

乡镇名称	不同生产力级别区面积/hm <sup>2</sup>				不同生产力稳定性级别区面积/hm <sup>2</sup>				合计
	I	II	III	IV	4(0.25, 0.38]	1 [0, 0.10]	2 (0.10, 0.18]	3 (0.18, 0.25]	
北沙乡	1622.23	1915.49	145.21	2225.09	797.94	706.73	1171.68	2416.83	5908.02
大营乡	253.85	1220.18	73.77	2334.51	1629.57	1791.85	191.44	0.00	3882.31
咎岗镇	49.25	1502.29	166.31	1765	1560.5	587.19	631.3	21.39	3482.85
龙湾乡	713.77	308.69	636.53	209.08	1821.07	615.07	1402.15	47.2	1868.07
米北乡	0.00	386.02	0.00	833	589.65	452.82	433.49	2376.02	1219.02
双堂乡	146.56	181.08	2025.15	391.74	1316.55	893.61	605.67	0.00	2744.53
雄州镇	1104.24	2205.08	215.03	2565.54	1200.04	1191.09	1777.63	343.18	6089.89
张岗乡	1364.74	8.72	0.00	1283.39	160.77	510.43	1492.62	446.33	2656.85
朱各庄乡	663.49	254.39	798.87	1703.38	646.19	1140.62	156.35	146.66	3420.13
总计	5918.13	7981.94	4060.87	13310.73	9722.28	7889.41	7862.33	5797.61	31271.67
百分比/%	18.92	25.52	12.99	42.56	31.09	25.23	25.14	18.54	100.00

不同标准量产量水平分布较为零散,但地块较为集中,表明雄县耕地质量集中度较高,具体表现为:标准量产量小于  $7\,500\text{ kg/hm}^2$  的地区主要分布在北部的北沙口乡和米家务乡以及东部的龙湾乡,其他乡镇少有分布,面积约为  $1\,143.13\text{ hm}^2$ ,占雄县总耕地面积的 37%,平均标准量产量为  $7\,112\text{ kg/hm}^2$ ;标准量介于  $7\,500\sim 9\,000\text{ kg/hm}^2$  的耕地集中分布于雄州镇和龙湾乡,北沙口乡分布最少,其他乡镇零星分布,面积达  $9\,978\text{ hm}^2$ ,占全县总耕地总面积的 31%,平均标准量产量为  $7\,890\text{ kg/hm}^2$ ;  $9\,000\sim 11\,250\text{ kg/hm}^2$  标准量的耕地地块有 3 个集中分布区域,面积  $6\,790\text{ hm}^2$ ,占全县耕地总面积的 21%,平均标准量产量为  $10\,185\text{ kg/hm}^2$ ,其中第一个位于北沙口乡友谊河以南和大营镇北部,面积约  $1\,619\text{ hm}^2$ ,占此波段耕地面积的 23.84%,第二个大部分位于咎岗镇,米家务乡北部少量分布,面积约为  $2\,170\text{ hm}^2$ ,比例为 31.96%;第三区域分布相对较零散,主要包括雄州镇大清河以北地区和龙湾乡葛各庄村、马务头村、洪城村周围,面积  $3\,000\text{ hm}^2$ ,占  $9\,000\sim 11\,250\text{ kg/hm}^2$  标准量耕地面积的 44.20%;大于  $11\,250\text{ kg/hm}^2$  的高标准量产量耕地面积为  $3\,553\text{ hm}^2$ ,占雄县耕地总面积的 11%,主要分布于雄县北部的双堂乡和大营镇,集中度较差,平均标准量产量为  $12\,090\text{ kg/hm}^2$ 。

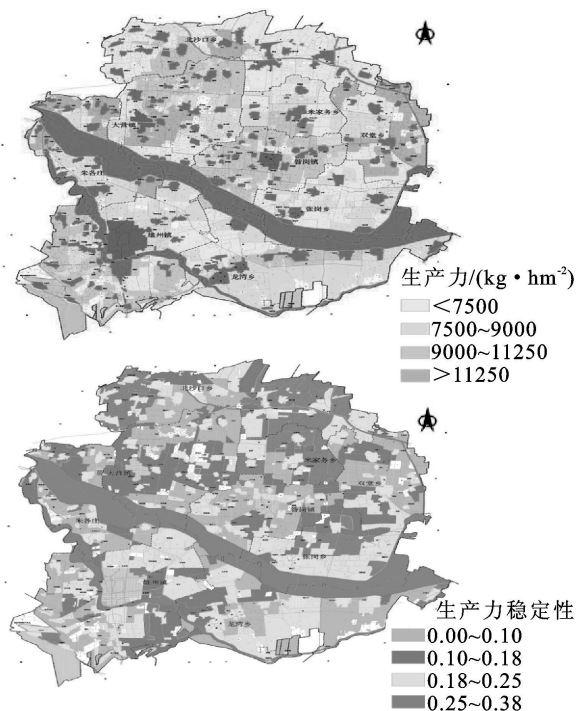


图 2 雄县耕地生产力及稳定性空间分布图

生产力稳定性方面,北沙乡和米北乡的耕地 4 类地分布最广,为  $4\,792.85\text{ hm}^2$ ,两个乡镇 4 类地面积占全县 4 类地总面积的 83.67%,耕地总面积的 15.33%;北沙乡、龙湾乡、雄州镇和张岗乡三乡镇 3

类地面积达到  $1\,000\text{ hm}^2$  以上,合计为  $5\,844.88\text{ hm}^2$ ,占到全县 3 类地总面积的 74.33%,耕地面积的 18.69%;大营乡、雄州镇和朱各庄乡三乡镇 2 类地面积均达到  $1\,000\text{ hm}^2$  以上,大营乡最大为  $1\,791.85\text{ hm}^2$ ,占 2 类地总面积的 52.27%,耕地总面积的 13.19%;1 类地主要分布在大营乡、咎岗镇和龙湾乡,为  $5\,011.14\text{ hm}^2$ ,占 1 类地面积的 51.54%。

### 3.3 雄县农田生态系统生产力空间差异性影响因素分析

由于个别指标数据未能获得,数据组过于庞大,本研究以生产力第三区因素为例对表土质地( $X_1$ )、排水条件( $X_2$ )、盐渍化情况( $X_3$ )、土壤有机质( $X_4$ )、灌溉保证率( $X_5$ )、土壤剖面构型( $X_6$ )、土壤全氮含量( $X_7$ )、碱解氮含量( $X_8$ )、速效磷含量( $X_9$ )、速效钾含量( $X_{10}$ )和土壤 pH 值( $X_{11}$ )等 11 个因素与耕地生产力空间变异系数( $D_1$ )变化的关系进行了分析。首先求出各变量的波动指数,然后设定条件属性  $C = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}$ ,决策属性  $D = \{D_1\}$ ,论域  $U = \{e_1, e_2, e_2, \dots, e_{33}\}$ ,  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_{33}$  表示 33 个研究对象。

应用 ROSETTA 软件的 Equal frequency binning 算法对表条件属性和决策属性进行离散化处理,产生了 34 个断点,计算出离散化的结果。针对表达系统  $S = (U, C \cup D)$ ,具有:论域  $U = \{e_1, e_2, e_2, \dots, e_{33}\}$ ,条件属性  $C = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}$ 和决策属性  $D = \{D_1\}$ ,根据本文基于属性依赖度的属性约简算法得出以下最小简化表。

对象的集合即论域  $U = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{14}, e_{15}, e_{16}, e_{17}, e_{18}, e_{19}, e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{24}, e_{25}, e_{26}, e_{27}, e_{28}, e_{29}, e_{30}, e_{31}, e_{32}, e_{33}\}$ ,条件属性  $C = \{X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ ,决策属性  $D = \{D_1\}$ 。

由等价关系  $X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  可以得到下述的等价类:

$$U/\text{ind}(C - \{X_4\}) = \{\{e_{31}\}, \{e_{18}\}, \{e_{24}\}, \{e_{15}\}, \{e_{26}\}, \{e_{29}\}, \{e_{13}\}, \{e_{22}\}, \{e_{23}\}, \{e_{25}\}, \{e_{33}\}, \{e_6, e_{17}, e_{19}\}, \{e_4, e_{11}\}, \{e_1\}, \{e_{14}, e_{16}\}, \{e_9, e_{28}\}, \{e_{10}\}, \{e_5\}, \{e_{12}\}, \{e_8\}, \{e_{20}\}, \{e_3, e_{32}\}, \{e_{27}\}, \{e_{21}\}, \{e_2\}, \{e_{30}\}, \{e_7\}\}$$

$$U/\text{ind}(C - \{X_5\}) = \{\{e_{20}, e_{31}\}, \{e_3\}, \{e_1\}, \{e_{27}\}, \{e_9\}, \{e_{14}\}, \{e_{26}\}, \{e_{12}, e_{13}\}, \{e_1\}, \{e_{18}, e_{32}\}, \{e_4, e_{19}\}, \{e_1\}, \{e_5\}, \{e_{21}\}, \{e_{28}\}, \{e_2, e_5\}, \{e_{23}\}, \{e_{33}\}, \{e_6, e_{11}, e_{17}\}, \{e_{24}\}, \{e_{16}\}, \{e_{10}, e_{29}\}, \{e_{30}\}, \{e_7\}, \{e_8\}, \{e_{25}\}\}$$

$$U/\text{ind}(C - \{X_6\}) = \{\{e_{13}\}, \{e_{22}, e_{31}\}, \{e_{26}\},$$



## 4 结果分析

### 4.1 耕地生产力

由表 4 可以看出, 雄县耕地生产力空间波动在不同阶段受到不同因素的影响:

(1) I 区内标准量产量主要受  $X_2$ 、 $X_4$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  和  $X_8$  等 5 大因素的影响, 且碱解氮( $X_8$ )和排水条件( $X_2$ )的影响程度最高, 分别为 33.33% 和 28.57%, 全氮( $X_7$ )和有机质( $X_4$ )含量对本区域生产力的影响次之, 土体构型( $X_6$ )的影响最弱;

(2) II 区耕地生产力主要受  $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_8$  和  $X_{10}$  的影响, 灌溉保证率( $X_5$ )和速效钾( $X_{10}$ )的影响最大在 20% 以上, 盐渍化情况( $X_3$ )和碱解氮( $X_8$ )的影响程度相似, 土体构型( $X_6$ )影响度最小。

(3) 因素  $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  和  $X_8$  III 区生产力的主导因素, 有机质( $X_4$ )和全氮( $X_7$ )的影响度最大为 29.73% 和 21.62%, 其他因素的影响程度相对较小。

(4) IV 区内的主导因素为  $X_2$ 、 $X_5$ 、 $X_6$  和  $X_7$  四个因素, 其中区域内全氮( $X_7$ )含量对耕地生产力的影响最大, 影响度为 35.71%, 其次为灌溉保证率( $X_5$ )和土体构型( $X_6$ ), 影响度在 20% 以上, 排水条件( $X_2$ )对生产力影响程度最低。

综上所述, 田块尺度上雄县农田生态系统生产力空间波动的主控因素主要有排水条件、有机质、灌溉保证率、全氮、碱解氮和速效钾, 在不同水平上主控因素对耕地生产力的影响程度亦不相同, 且不难看出, 随着生产力的不断升高, 人为因素和自然因素对生产力的影响出现交替现象, 具体表现为: 生产力相对较低区人为因素和土壤自然属性共同作用, 生产力较高区人为因素占主导地位。

### 4.2 耕地生产力稳定性

由表 5 可以看出, 雄县农田生态系统生产力稳定性空间波动在不同阶段受到不同因素的影响:

(1) I 区内稳定性空间波动受多种因素的影响, 分别为排水条件( $X_2$ )、盐渍化情况( $X_3$ )、有机质( $X_4$ )、灌溉保证率( $X_5$ )、土体构型( $X_6$ )和全氮( $X_7$ ), 而全氮、土体构型和有机质的影响度最大, 说明在生产力稳定性较低的波动区内, 人为控制因素是标准粮产量波动的主控因素, 自然因素的影响相对较低。

(2) 2 区生产力稳定性主要受  $X_3$ 、 $X_6$ 、 $X_8$ 、 $X_9$  和  $X_{10}$  的影响, 盐渍化情况、土体构型等自然因素对生产力的影响对生产力稳定性的影响略大于人为因素。

(3) 因素  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_6$  是 3 区生产力稳定性的主导因素, 其中有机质( $X_4$ )的影响度最大为 36.36%, 其他因素的影响程度相对较小。

(4) 4 区内的主导因素为  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_7$  等 4 个因素, 其中区域内全氮含量对耕地生产力的影响最大, 影响度为 34.48%, 其次为灌溉保证率( $X_5$ )和盐渍化情况( $X_3$ ), 影响度在 20% 以上, 排水条件( $X_4$ )对生产力稳定性影响程度最低。

以上分析表明田块尺度上雄县农田生态系统生产力稳定性空间波动的主控因素主要有全氮、土体构型、盐渍化情况和有机质含量, 在不同水平上主控因素对生产力稳定性的影响程度亦不相同。总体上看, 人为作用对雄县农田生态系统生产力稳定性的影响最大, 土壤自然属性因素在中等稳定程度上与人为因素相当。

## 5 结论

研究以河北省雄县农田生态系统为研究对象, 通过剖析农田生态系统生产力稳定性理论及内涵, 构建了田块尺度农田生态系统生产力及生产力稳定性的评价指标体系, 以标准粮产量作为农田生态系统生产力的表征指标, 采用实地调查、室内分析、微观实验和图件处理等方法, 分析了雄县农田生态系统生产力及生产力稳定性空间分布规律及特征, 并对影响生产力和生产力稳定性的影响因素进行了分析。

(1) 雄县标准粮产量最高为  $13\,365\text{ kg/hm}^2$ , 最低仅为  $6\,480\text{ kg/hm}^2$ , 不同标准量产量水平分布较为零散, 但地块集中, 表明雄县耕地质量集中度较高。其中高产地块面积为  $13\,310.73\text{ hm}^2$ , 占全县耕地总面积的 42.56%, 低产地块面积  $5\,918.92\text{ hm}^2$ , 占 18.92%。排水条件、有机质、灌溉保证率、全氮、碱解氮和速效钾是田块尺度上生产力空间波动的主控因素, 随着生产力的不断升高, 人为因素和自然因素对生产力的影响出现交替现象, 具体表现为: 生产力相对较低区人为因素和土壤自然属性共同作用, 生产力较高区人为因素占主导地位。

(2) 雄县农田生态系统生产力稳定性 1 类变异区( $[0, 0.10]$ )面积分布最大为  $9\,722.28\text{ hm}^2$ , 占雄县耕地总面积的 31.09%; 2 类变异区( $(0.10, 0.18]$ )和 3 类变异区( $(0.18, 0.25]$ )面积相当, 分别为  $7\,889.41\text{ hm}^2$  和  $7\,862.33\text{ hm}^2$ , 占总面积的 25.23% 和 25.14%; 4 类变异区( $(0.25, 0.38]$ )面积分布最小, 仅占耕地总面积的 18.54%。生产力稳定性空间波动的主控因素主要有全氮、土体构型、盐渍化情况和有机质含量。总体上看, 人为作用对雄县农田生态系统生产力稳定性的影响最大, 土壤自然属性因素在中等稳定程度上与人为因素相当。

(3) 雄县各影响因素中, 土壤养分对生产力及稳

定性的影响程度均较大, 从整体来看, 全县土壤全氮、速效磷含量属于中等水平、有机质、碱解氮含量较低, 速效钾含量较高。空间上县域内西南部高, 中部和北部较低的分布规律, 并呈现出梯度下降的格局。从时间变化上全县整体水平呈现下降趋势, 西南部下降程度较低, 北部地区元素含量下降程度较大。土壤养分时间和空间上的变化对耕地生产力及稳定性的影响是客观的, 但有不乏人为施肥等客观因素的影响, 对其研究有待进一步加强。

参考文献:

[ 1 ] 朱万斌, 邱化蛟, 常欣, 等. 农业生态系统生产力的概念及其度量方法[ J ]. 中国农业科学, 2005, 38( 5 ): 983-989.

[ 2 ] 王树涛, 门明新, 齐跃普, 等. 基于指数法的农田生态系统生产力稳定性研究[ J ]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24( 4 ): 427-431.

[ 3 ] 朱万斌, 邱化蛟, 常欣. 农业生态系统生产力的概念及其度量方法[ J ]. 中国农业科学, 2005, 38( 5 ): 983-989.

[ 4 ] 王树涛, 门明新, 李新旺, 等. 河北平原区农田生态系统生产力稳定性及影响因子时序特征: 以雄县为例[ J ]. 自然资源学报, 2009, 24( 5 ): 871-880.

[ 5 ] MacArthur R. Fluctuations of animal populations, and a measure of community stability[ J ]. Ecology, 1955, 36: 533-536.

[ 6 ] Elton C S. The ecology of invasions by animals and plants[ M ]. London: Chapman and Hall, 1958: 143-153.

[ 7 ] Garder M R, Ashky W R. Connectance of large dynamic (cybernetic) system: critical for stability[ J ]. Nature, 1970, 228: 78-788.

[ 8 ] May R M. Will a large complex system be stable? [ J ]. Nature, 1972, 238: 413-414.

( 上接第 211 页 )

[ 7 ] 李冰. 大兴安岭兴安落叶松林健康评价研究[ D ]. 北京: 北京林业大学, 2009.

[ 8 ] 周根苗, 薛亮, 冯超, 等. 风景林景观美学评价指标体系的探讨[ J ]. 林业资源管理, 2008, 5( 5 ): 69-74.

[ 9 ] 赵德海. 风景林美学评价方法的研究[ J ]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1990, 14( 4 ): 51-55.

[ 10 ] 瞿明普, 张荣, 阎海平. 风景评价在风景林建设中应用研究进展[ J ]. 世界林业研究, 2003, 16( 6 ): 16-19.

[ 11 ] 陈鑫峰. 京西山地区森林景观评价和风景游憩林营建研究: 兼论太行山区的森林游憩业的建设[ D ]. 北京: 北京林业大学, 2000: 20-40.

[ 12 ] Canada, Province of British Columbia Ministry of Forests. Forest Landscape Handbook[ Z ]. Ottawa: Information Services Branch, Ministry of Forests, 1981: 100.

[ 13 ] 赵永泉, 彭道黎. 北京鹫峰公园主要人工林群落多样性

[ 9 ] May R M. Stability and complex city in model ecosystems[ M ]. Princeton: Princeton University Press, 1974.

[ 10 ] McNaughton S J. Diversity and stability of ecological community: a comment on the role of empiricism in ecology [ J ]. The American Naturalist, 1997, 111: 515-525.

[ 11 ] Frank D A, McNaughton. Stability increases with diversity in plant community: empirical evidence from the 1998 Yellowstone drought [ J ]. Oikos, 1991, 62: 360-363.

[ 12 ] Conndll J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[ J ]. Science, 1978, 199: 1302-1310.

[ 13 ] Tillman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability[ J ]. Ecology, 1996, 77: 350-362.

[ 14 ] Tillman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands[ J ]. Nature, 1994, 367: 350-362.

[ 15 ] Hariston N G, Allan J D, Colwell R K, et al. The relationship between species diversity and stability: an experimental approach with protozoa and bacteria[ J ]. Ecology, 1968, 49: 1091-1101.

[ 16 ] Lawler S P, Worin P J. Food web architecture and population dynamics in laboratory microcosms of protists [ J ]. The American Naturalist, 1993, 241: 675-686.

[ 17 ] Hurd L E, Mellinger M V, Wofl L L, et al. Stability and diversity at three trophic levels in terrestrial ecosystem[ J ]. Science, 1971, 173: 1314-1316.

[ 18 ] Luckingbull L S. Regulation, stability, and diversity in a modal experimental microcosm[ J ]. Ecology, 1979, 60: 1098-1102.

[ 19 ] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[ M ]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.

[ 20 ] 刘清. Rough 集及 Rough 推理[ M ]. 北京: 科学出版社, 2001.

研究[ J ]. 西南林学院学报, 2008, 28( 1 ): 17.

[ 14 ] Savolainen R, Kellom ä ski S. Scenic value of forest landscape[ J ]. Acta Forestalia Fennica, 1981, 170: 1-80.

[ 15 ] Kopka S, Ross M. A study of the reliability of the Bureau of Land Management visual resource assessment scheme[ J ]. Landscape Planning, 1994, 11( 2 ): 161-166.

[ 16 ] Shafer E L, Rutherford W. Slection cuts increased natural beauty in two Adirondack forest stands[ J ]. J. For, 1996, 67: 415-419.

[ 17 ] 吴楚材. 张家界森林公园研究[ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1991.

[ 18 ] 金莹杉, 瞿明普, 王超, 等. 北京西山风景林景观空间分布格局研究[ J ]. 北京林业大学学报, 2007, 29( 3 ): 74-80.

[ 19 ] 高俊凯. 森林健康基本理论及评价方法研究[ D ]. 北京: 北京林业大学, 2007: 30-52.