

冀东平原农业景观格局与生态服务价值研究 ——以滦县为例

赵志刚^{1,4}, 王凯荣², 向开成¹, 谢小立³

(1. 湖南农业大学 生物科学安全技术学院, 长沙 410128; 2. 青岛农业大学 农业生态与环境健康研究所, 山东 青岛 266109;
3. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 4. 宜春学院 生命科学与资源环境学院, 江西 宜春 336000)

摘要:以冀东平原区域的河北滦县两期土地利用现状图为基础,结合 GIS 及 Fragstats 软件,对 1996 年、2009 年景观格局及其生态服务价值进行分析。结果表明:13 a 来,滦县农田景观优势度降低,建设地景观优势度增高,破碎度增大,景观形状趋于简单。两期比较,总生态服务价值(ESV)减少了 1 336.19 万元,其中建设地景观扩展是生态服务价值减少的最主要因素。生态服务价值变化同农业景观格局演化之间紧密相关,其中景观斑块面积、景观斑块种类、斑块数量及破碎度等指数的变化都会引起区域生态服务价值波动。可通过保护区域林地、园地、水域等关键景观类型,增加有效网络面积和连通性,减少干扰以降低斑块破碎度等措施来增强区域的生态系统服务价值,更好地支撑和保证区域的可持续发展。

关键词:滦县; 农业景观; 景观格局; 生态服务价值; 相关性

中图分类号:F303.4; X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0221-06

Assessment on Agricultural Landscape Pattern and Ecosystem Service Values of Jidong Plain ——A Case Study of Luan County

ZHAO Zhi-gang^{1,4}, WANG Kai-rong², XIANG Kai-cheng¹, XIE Xiao-li³

(1. College of Bio-Safety Science and Technology, Hu'nan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. Institute of Agricultural Ecology and Environmental Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 4. College of Life Science and Resources and Environment, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract:Based on the map regarding the status quo of land use in its two different periods, combining with GIS and Fragstats software, this paper analyzed landscape patterns and ecosystem service values (ESV) of Luan County in 1996 and 2009. The results showed that its farmland landscape dominance index reduced, but its landscape dominance of construction land raised, landscape fragmentation index increased (aggravated), and landscape shape tended to be simple during the 13 years between 1996 and 2009. The total ecological service value decreased by 1.336×10^7 Yuan from 1996 to 2009, with construction landscape expansion the biggest single component. Moreover, the change of ecological service value and the evolution of agricultural landscape pattern were closely related, the variations of indices in patch area, patch type, patch number and fragmentation would cause the fluctuations of regional ecological service value. Therefore, it would be important to take measures including protection of the critical landscape types such as shrub, grassland, and woodland, increase of the patch size and connectivity, and reduction of the frequency and severity of disturbances to avoid further fragmentation, so as to ensure the ESV growth and the sustainable development of the study area.

收稿日期:2011-10-12

修回日期:2011-11-20

资助项目:中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-423);滦县 1996—2020 年土地利用总体规划项目

作者简介:赵志刚(1977—),男,陕西西安人,讲师,博士研究生,研究方向为景观生态学。E-mail:zhaozg_77@163.com

通信作者:谢小立(1958—),男,湖南长沙人,研究员,研究方向为农业生态学。E-mail:xlx@isa.ac.cn

Key words: Luan County; agriculture landscape; landscape pattern; ecosystem service values; correlation

农业景观一般指草地、耕地、林地、树篱及道路等多种景观斑块的镶嵌体,表现为物种生存于其中的各类破碎化栖息地的空间网格^[1];广义的农业景观包括农田、果园及厂矿、人工林地、农场、牧场、水域和村庄等生态系统,以农业特征为主,是人类在自然景观基础上建立起来的自然生态结构与人为特征的综合体^[2]。景观空间格局是景观生态学的重要研究内容之一,最常用的定量化研究方法^[3]是用景观指数描述景观格局特征,建立景观格局与生态过程之间的联系,生态系统服务价值指人们能够直接或者间接从生态系统功能中获取的产品和服务^[4],近年来生态系统服务价值的研究逐渐成为生态学研究的一个热点问题。本文参照 Costanza 等^[4]人提出的生态服务价值计算方法,以景观之间的转化数据为基础,以冀东平原典型区域——河北滦县为例分析生态系统服务价值的变化,并借助土地利用图进行分类,结合 GIS 和 Fragstats 软件进行计算与分析,研究农业景观格局与动态变化,并简要探究景观格局与生态系统服务之间的相关性,这些内容对深入研究生态系统服务与景观

格局的内在变化,进一步揭示生态系统服务变化的驱动机制具有重要意义,并可为指导冀东平原区域农业生产和农业景观生态设计与发展规划提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

滦县地处冀东燕山南麓,滦河西畔,总面积 1 027.67 km²,是传统农业大县。其地理坐标 118°14′—118°49′E,39°34′—39°58′N;辖 13 个镇,全县地势北高南低,山丘面积约占 22%,中部、南部为滦河冲积平原,地势平坦,约占全县的 60.4%,县域河道纵横,有滦河、沙河、白龙河等 11 条河流。滦县属季风性大陆气候区,全年平均气温 10.5℃,常年平均降雨量为 715 mm。

本研究采用 1996 年、2009 年滦县土地利用现状图及矢量化图,结合滦县区域的实际情况,将其农业景观类型划分为 6 种类型(表 1):林地景观、农田景观、园地景观、建设地景观、水域景观、荒地景观。使用 ArcGIS 9.3 将矢量数据栅格化(图 1),并将栅格数据导入 Fragstats 3.3 中进行景观空间格局指数的计算。

表 1 滦县农业景观类型

景观类型	具体内容	景观类型	具体内容
FOR-L	灌木林,疏林地,自然景区	CON-L	道路,村庄,建制镇,工矿地
FAR-L	水田,旱地,水浇地	WAT-L	库塘,河流
GAR-L	果园,桑园	DES-L	荒草地,滩涂,沙地,裸地

FOR-L——林地景观;FAM-L——农田景观;GAR-L——园地景观;CON-L——建设地景观;WAT-L——水域景观;DES-L——荒地景观。

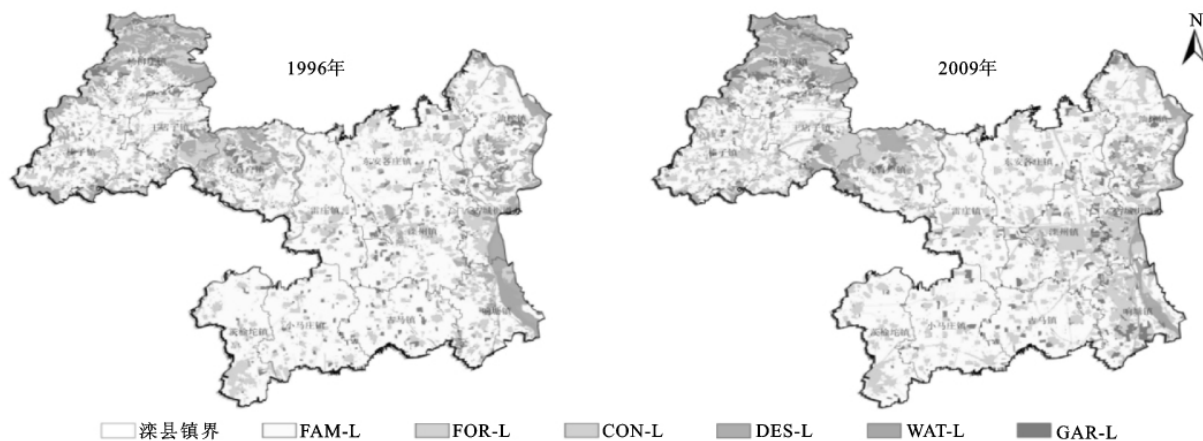


图 1 1996 年、2009 年滦县农业景观类型

2 研究方法

2.1 景观格局指数

景观指数是景观格局信息的高度浓缩,能定量反映其结构组成和空间配置特征,能建立景观结构与过程间的联系,更好地解释与理解景观功能。许多学者应用该理论和方法在土地利用、环境和自然保护、农

业等方面作了大量的工作,依此描述建设用地景观的形态及分布情况,取得了较好效果^[5-6]。

本文主要选取表现景观要素、分布和形状特征的指标,包括斑块总面积(CA)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、分维数(PFD)、稳定性指数(SK)。各个指标的表达式及其生态学意义可以参见文献^[7-9]。

2.2 生态系统服务评估指标

生态系统服务评估指标的选取是以生态系统服务功能为基础。在本研究中,参照 Daily^[10]、联合国千年生态系统评估(MA)^[11]和谢高地等^[12]的方法,将滦县生态系统的服务功能划分为产品服务和生命支持服务 2 个层面,服务类型包括供给、调节和文化服务 3 大类型,形成食物生产、原材料、气体调节、气候调节、水源涵养、废物处理、土壤保持、生物多样性保护、娱乐文化 9 项评估指标。

2.3 生态系统服务价值评估方法

食物生产与原材料价值由净第一性生产力、标准煤价格求算^[13];根据植被净初级生产力、光合作用反应方程式与瑞典碳税率及工业制氧价求算气体调节价值^[14];依照单位面积绿地改善区域温度、湿度等能力及改善所需人工费用来估算气候调节价值;通过降雨径流率与植被覆盖度以及库容成本求算水源涵养价值^[15];依据植物对 SO₂、滞尘等的吸收能力及治理费用估算废物处理的潜在价值^[16];依据潜在和实际土壤侵蚀量估算土壤保持量^[17],结合土壤中 N,P,K 含量和化肥平均价格估算土壤形成与保护价值^[18];依据费用支出法考虑用于生物多样性保护所需要经济价值成本来测算生物多样性的经济价值^[19];通过市场价值法估算区域旅游娱乐综合收入测算娱乐文化的经济价值^[20]。

以 Costanza 的研究方法^[4]为基础,确定生态系统服务价值评估公式为:

$$ESV_i = \sum_{j=1}^n V_{Cij} \times A_i \tag{1}$$

$$ESV = \sum_{i=1}^n ESV_i \tag{2}$$

式中:ESV_i——第 i 类农业景观系统的生态服务价值(元);V_{Cij}——第 i 类农业景观系统的第 j 种土地生

态系统服务类型单位面积价值[元/(hm²·a)];A_i——第 i 类土地利用类型的面积(km²);ESV——研究区生态系统总生态服务价值。

3 结果与分析

3.1 农业景观面积转移矩阵分析

由表 2 可以看出,研究区的各农业景观类型面积在 1996—2009 年间均发生较大变化。林地主要集中于西北坡地区域,面积较小,占研究区比例为 5.59%,其 2009 年面积达到 26.81 km²,面积增加主要是由农田和荒地转变来,这主要是由于研究年份间增加了农田防护林的建设与加大了荒地绿化利用,荒地与伦地的转换主要发生在西北坡地区域。农田景观面积最大,两期面积均占到总面积的 50%以上,但 1996—2009 年总面积比例降低了 10.73%,分析农田的转出方向可以发现,该类型用地在研究时期内主要转变为城市建设用地,其次是园地和林地,相较于农田用地的转出状况,其转入面积并不显著。建设地快速扩展,从 1996 年的 108.91 km² 增加为 2009 年的 184.22 km²,主要由农田和荒地转化而来,农田与荒地 对 2009 年建设地贡献比例分别为 39.32% 和 7.25%,1996 年原有建设地贡献为 46.02%。园地景观面积略有上升,从 1996 年的 41.35 km² 增加为 2009 年的 49.42 km²,主要是和农田进行面积转换。水域和荒地面积呈减少趋势,研究时段内分别降低了 12.32% 和 23.20%,水域主要转换为农田、荒地和建设地,而农田和荒地的补充也相对较多,主要原因在于 1996—2009 年间农田的集约化,导致部分农田建设重新布局,新增和填埋部分坑塘水面产生面积转换,而水域与荒漠的转化也多发生在滩涂与河流间的面积交换。

表 2 1996—2009 年各景观面积相互转移矩阵 km²

景观类型	2009 年							总计
	FOR-L	FAR-L	GAR-L	CON-L	WAT-L	DES-L		
1996 年	FOR-L	25.62	14.81	1.79	5.17	0.75	9.34	57.49
	FAR-L	26.81	524.02	29.78	72.41	6.01	18.47	677.49
	GAR-L	3.58	17.46	11.38	5.35	0.26	3.33	41.35
	CON-L	2.59	14.48	2.21	84.77	1.04	3.82	108.91
	WAT-L	2.07	7.77	0.56	3.16	5.91	3.98	23.46
	DES-L	16.63	26.23	3.71	13.36	6.60	52.44	118.98
	总 计	77.31	604.77	49.42	184.22	20.57	91.38	1027.67

3.2 农业景观类型水平上的格局指数

最大斑块指数(LPI)值的大小可反映景观类型的优势度^[7]。由图 2 看出,1996—2009 年,研究区一直占据优势和主导地位的景观类型是农田景观,这与研究区平原地势的自然条件相吻合,但 13 a 间农业优势

度总体下降明显,由 41.50% 降为 12.15%。1996 年,荒地、林地和建设地景观最大斑块指数分别为 1.42%,0.80%,0.77%;2009 年,建设地景观变化较大,13 a 上升差值为 5.43,仅次于农田景观类型,林地、荒地值少量增加,园地、水域基本无变化。这主要是 1996 年以

来,随着工业化发展与人口增加引起交通用地、建设用地的增多,及国家退耕还林措施的开展,部分农田转化为建设地与林地。2009 年建设地景观优势度显著增长,明显高于其它景观类型,这期间农用地的减少及分割引起农业景观优势度的迅速降低。

斑块密度(PD)大小可以反映景观斑块的分化程度或破碎化程度^[7]。由图 2 看出,1996—2009 年景观斑块的数量和格局发生了一定程度的变化。1996 年荒地、建设地、园地景观列前三位,水域、林地、农田

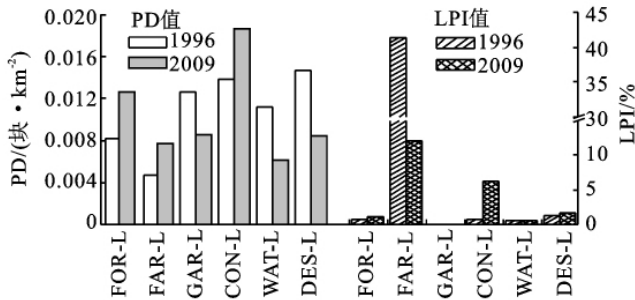


图 2 1996 年、2009 年水平格局指数

3.3 农业景观类型分维数与稳定性指数

分维数(PFD)是其运用了分维理论来测量斑块和景观的空间形状复杂性,其值介于 1.0~2.0 之间^[9]。分维数对土地利用变化是相当敏感的^[21],因此分维数是反映景观格局总体特征的重要指标,它的变化在一定程度上也反映了人类活动对景观格局的影响程度^[22]。根据分维数进一步可以计算地类空间结构稳定性指数,其值越大,空间结构越稳定,可为科学利用土地与景观空间分析提供参考^[9],计算公式为^[23]: $SK = |1.5 - PFD|$,SK 为地类空间结构稳定性指数。

由图 3 可以看出,1996 年林地、园地和建设地景观分维数值较低,表明其形状较规则,这是由于平原区域属自然原型的林地较少,该区域多为次生林或人工林,园地和建设地在前期也较为规整,而农田的分维数值较大,其形状相对复杂,说明 1990s 农田的开发度较高,在一些土地欠规整区域也以农田景观为主;大部分水域、荒地是以自然景观为主,因此形状也相对复杂。

至 2009 年,建设地景观的分维数增幅最快,由 1996 年的 1.11 升高至 1.23,说明建设地对空间的快速扩张增加了其景观形状的复杂性;人类活动对于农田景观的相对减弱致农田处于收缩趋势,部分复杂农田景观由于地形与耕作难度大被摒弃,因此农田景观分维数由 1.31 降至 1.25;林地和园地的总面积增加而分维数变化不明显,说明林地和园地景观的增加区域依然以较规则的人工建设为主;坑塘水面的占用致

景观为后三位;2009 年顺序改变为:建设地、林地、园地、荒地、农田和水域景观。其中建设地、林地、农田 3 类景观斑块密度值增加;园地、荒地、水域三类景观斑块密度值减少。说明在研究年份间,人类活动增加了林地、建设地景观斑块建设,农田景观由于受到其它斑块的影响,造成破碎化程度增加,密度提高。荒地景观由于利用率增加,水域景观中如坑塘水面的填埋占用,园地景观的整合与规模化经营等导致这些景观斑块密度的降低。

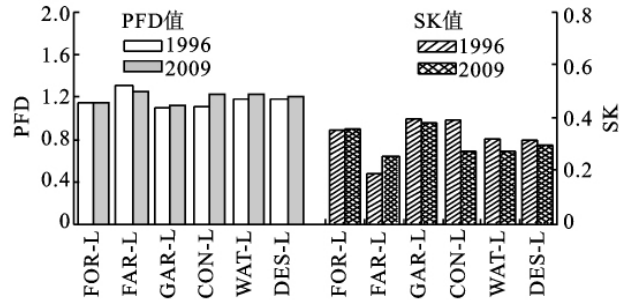


图 3 1996 年、2009 年复杂性与稳定性指数

使河流、湖面等自然水域景观的水域比重增加,因而其景观形状复杂性增加;荒地景观复杂性的增加主要是由规整区域土地利用率的提高导致。整体上看,1996 年,农田景观稳定性最低,园地与建设地景观最为稳定,这与其为人工建设、结构简单有关;2009 年,由于建设地扩张迅猛,导致复杂性加强,因而稳定性下降最快,而农业景观稳定性增加最快,林地、园地稳定性变化不大。

3.4 各类景观生态服务价值(ESV_i)计算

为方便比较,引入生态服务价值贡献系数(C),即该类景观生态服务价值所占区域生态服务总价值比例与某类景观面积所占总面积比例的比值。C 越大说明 i 类景观的生态价值贡献越大。生态服务价值变化率是 2009 年与 1996 年生态服务价值之差再与 1996 年的生态服务价值的比值。

由表 3 可知,在生态服务价值构成中,居于前三位的是农田、园地和林地,其次是水域和荒地景观,建设地景观由于对环境的消耗作用而评估为负值。农田由于面积最广,因此其生态服务价值在 1996 年和 2009 年分别为 16 319.98 万元和 14 567.60 万元,所占生态服务价值的比例分别为 58.88%和 55.22%;林地所占生态服务价值比例分别为 18.79%和 26.55%;园地分别占到 19.37%和 24.33%。园地的生态服务价值贡献系数测算为最大,这是由于其除具有一般林地的功能外,还主要由食物生产的价值。林地与水域价值基本相当,农田对于生态服务价值的贡献系数小于 1,荒地贡献系数不足 0.5。这种结果既与生态服

务价值系数的大小有关,又反映了不同景观对于维持生态系统服务价值的各自作用。从生态服务价值变化率可以发现各景观生态服务价值波动,其中林地、园地生态服务价值增加,农田、河流和荒地的生态服务价值降低,建设地由于贡献率为负值,因此变化率增加其生态服务价值量在降低。其中林地的价值变化最大,约增加了 1 796.58 万元,其次是园地,约增加了 1 048.83 万元。建设地由于增加最快,因此其服务价值下降最多,达到 1 856.42 万元,其次是农田,其服务价值减少了 1 752.38 万元。

表 3 1996—2009 年各类景观生态服务价值

景观类型	1996 年			2009 年			ESV 变化率/ %
	ESV _i /万元	比例/%	C	ESV _i /万元	比例/%	C	
FOR-L	5208.56	18.79	3.36	7005.14	26.55	3.53	34.49
FAR-L	16319.98	58.88	0.89	14567.60	55.22	0.94	-10.74
GAR-L	5370.05	19.37	4.81	6418.88	24.33	5.06	19.53
CON-L	-2684.08	-9.68	-0.91	-4540.50	-17.21	-0.96	69.16
WAT-L	2203.55	7.95	3.48	1932.09	7.32	3.66	-12.32
DES-L	1300.60	4.69	0.41	999.26	3.79	0.43	-23.17
ESV	27718.66	100.00		26382.47	100.00		-4.82

3.5 各景观间生态服务价值的流向分析

根据各景观类型面积转化数据计算景观之间的相互转化所引起的生态服务价值的损益,即 $PL_{ig} = \Delta VC \times A_{ig}$, PL_{ig} 为 1996 年第 i 类景观转化为 2009 年第 g 类景观后的生态服务价值损益, ΔVC 是第 i 类景观和第 g 类单位面积总生态系统服务类型价值差值, A_{ig} 是 1996 年第 i 类景观转化为 2009 年第 g 类景观的面积。

将景观类型生态服务价值的增减视为流动的,生态服务价值的增加视为流入,生态服务价值的减少视为流出(表 4)。由表 4 可以看出,林地、园地和水域的

服务价值主要流出到农田、建设地和荒地。农田的服务价值主要流出到建设地和荒地。荒地的服务价值也主要流出到建设地。而建设地和荒地的流出均有利于服务价值的增加。从纵列合计来看,1996—2009 年间林地、园地和水域的流出造成的服务价值的损失为 6 706.91 万元。农田、建设地和荒地的流入带来的服务价值增加量为 5 370.71 万元,总量减少了 1 336.19 万元。因此,研究年份间各景观的转化是有损于整体农业生态系统服务价值,而要保持农业景观生态服务价值更好地发展,则需要更加合理的景观格局。

表 4 1996—2009 年各类景观生态服务价值流向损益 万元

景观类型		2009 年						总计
		FOR-L	FAR-L	GAR-L	CON-L	WAT-L	DES-L	
1996 年	FOR-L	0.00	−985.25	70.26	−595.89	2.51	−744.24	−2252.62
	FAR-L	1783.56	0.00	3150.01	−3528.81	419.91	−243.02	1581.65
	GAR-L	−140.51	−1846.85	0.00	−826.63	−9.34	−396.05	−3219.38
	CON-L	298.52	705.67	341.47	0.00	123.35	135.90	1604.90
	WAT-L	−6.92	−542.88	20.11	−374.78	0.00	−330.44	−1234.91
	DES-L	1325.14	345.12	441.24	−475.30	547.97	0.00	2184.16
	总计	3259.79	−2324.19	4023.08	−5801.42	1084.39	−1577.85	−1336.19

4 农业景观格局演变与生态服务价值关联性

4.1 农业景观格局演变对土壤保持的影响

不同的农业景观类型对土壤的作用不同,其中,林地、园地景观对涵养水源,保持水土的作用最强,因此,林地、园地景观面积的增加可以提高农业生态系统土壤保持,而农田、荒地、建筑地景观的增加会提高水土流失,扩大水土流失的面积。本研究中,农田、建设地、荒地等向园地、林地流动获得了较大的生态服务价值,其中部分价值差来自对土壤保持的增加,因

此,改变各景观类型的面积比例,可以形成有利于区域合理的景观结构,如减少坡地处农田、建设地集约化、提高荒地绿地面积等措施可有效提高区域生态服务价值。此外,盛学斌等^[24]的研究还表明,景观格局的演变会引起土壤中有机质、全 N、全 P、全 K 等养分呈有规律的改变,当土地由草地变为林地、旱地变为林地、旱地变为水田时,总体养分增多,这些也会对供给、调节服务产生影响,从而改变区域生态服务价值的评估。

4.2 农业景观格局演变对生物多样性的影响

农业景观相较城市景观,其与自然景观联系更为

密切。因此,林地、农田、水域等景观类型的破碎化对物种多样性有严重影响。生境破碎化是世界范围内生物多样性最严重的威胁之一^[25]。景观格局演变是一个动态过程,其生境破碎化会造成原始生境损失、生境斑块缩小、生境斑块孤立等特征。本研究表明大面积斑块(如农田、建筑地、林地等)表现为斑块密度增加,斑块数量增多,农田与林地平均斑块面积逐渐减小,斑块逐渐变得孤立,斑块受边缘影响程度增加。这些斑块间物理环境的改变,缩小某一类生境的斑块面积,影响到种群的大小和灭绝速度;同时在不连续的片段中,残留面积的再分配会影响物种的散布和迁移,这些因素都会影响到生物多样性,进而影响生态服务价值中这类指标的评估。

4.3 农业景观格局演变对生态环境的影响

景观格局与生态过程之间存在紧密关联,区域地表水环境污染是重要的生态过程之一。农业景观格局一般是非点源污染过程,主要包括农田的农药化肥使用、禽畜养殖排污等。一般是源(景观)的污染物通过径(景观)进入汇(景观),不同景观的源、汇特征、组合的数量比例和空间分布的排列方式,均对非点源污染产生影响^[26]。本研究中,1996—2009 年间农田面积的降低,减少了源(景观)污染物的排放,同时也降低了径(景观)和汇(景观)的污染物的流动,部分原因应该是 2009 年相关类型景观生态服务价值贡献系数的升高。此外,温仲明^[27]等在黄土丘陵区纸坊沟流域开展的近 60 a 来土地利用景观变化的环境效应研究表明,随着由林草植被占优的景观格局演变为由坡耕地占优的景观格局,流域环境状况逐步恶化,而随着流域治理工作的开展,林草植被在景观中的优势度得以逐渐恢复,流域环境状况逐渐恢复乃至接近 1938 年植被未被破坏时的水平。这些研究均表明农业景观格局的变化对生态环境的影响会间接导致生态服务价值的波动。

5 结 论

(1) 研究表明,13 a 来,滦县农业景观格局变化较大,其中农田景观优势度降低、建设地景观优势度增高,其他类景观相对变化较小,景观整体破碎度增大,景观斑块形状趋于简单。从空间分布趋势来看,林地、园地景观向西北部坡地转移明显,建设地景观主要集中于中部平原区域。

(2) 生态服务价值评估表明,园地、水域、林地景观对服务价值的贡献率较大,13 a 来滦县县域生态服务价值减少了 1 336.19 万元,其中建设地景观扩展

是生态服务价值减少的最主要因素。生态服务价值变化同农业景观格局演化之间紧密相关,景观斑块面积、景观斑块种类、斑块数量及破碎度等指数的变化都会引起区域生态服务价值变化。

(3) 景观格局演变除自然因素外,更多的是由人类活动的影响所造成的,一般人类活动的社会经济和政策因素对景观影响较大^[28]。因此,可通过经济调节与政策约束等保护区域林地、园地、水域等关键景观类型,增加其面积比例,同时加大有效网络面积和连通性,减少干扰以免斑块破碎度增加,这些都可增强冀东平原区域的生态系统服务价值,更好地支撑和保证该区域的可持续发展。

参考文献:

- [1] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns[J]. *Landscape Ecology*, 1990, 4(1): 21-30.
- [2] Cook E A, Van Lier H N. Landscape planning and ecological networks [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.
- [3] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 121-125.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [5] 彭建,王仰麟,刘松. 海岸带土地持续利用景观生态评价[J]. *地理学报*, 2003, 58(3): 363-371.
- [6] 蔡为民,唐华俊,陈佑启,等. 近 20 年黄河三角洲典型地区农村居民点景观格局[J]. *资源科学*, 2004, 26(5): 89-97.
- [7] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [8] 沈非,查良松,李军利,等. 基于分维数和稳定性指数的苏州市土地利用类型变化分析[J]. *土壤*, 2007(6): 958-963.
- [9] 刘晓辉,吕宪国,董贵华. 分维模型在土地利用研究中的应用[J]. *地理科学*, 2008, 28(6): 765-769.
- [10] Daily G C. Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington: Island Press, 1997.
- [11] Millennium Ecosystem Assessment: Frameworks[Z]. Washington D C: World Resources Institute, 2005.
- [12] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [13] 胡晓辉,黄民生,张虹,等. 福建省县域农业生态系统的能值空间差异分析[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 155-162.

(下转第 230 页)

较回归模型模拟精度高,预测结果较好。这说明对于复杂的坡面降雨径流,利用具有非线性映射功能的 BP 网络模型,能更好地模拟坡面降雨径流的复杂特性,更好地预测次降雨的径流量。

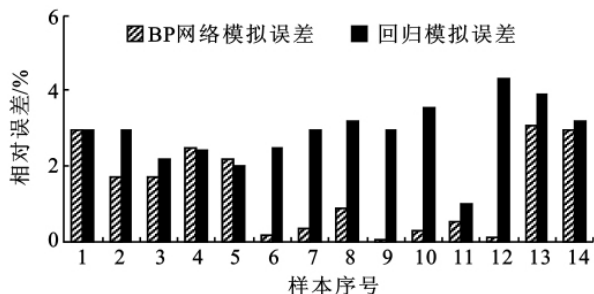


图 1 BP 网络模型误差和回归模型误差比较

4 结论

(1) 利用坡面降雨产流 BP 网络模型预测不同土地经营方式下径流量规律,效果较好,平均误差不超过 10%,具有较高径流量的翻耕地训练精度及预测结果较草灌地、刈割准确性更高。模型输入变量中,植被盖度、降雨强度、坡度、土壤前期含水率和土壤容重比较容易测定,模型便于利用,与回归模型相比较,该模型能更好地模拟不同土地经营方式下的降雨产流复杂非线性特性,能更好的预测次降雨的径流量。

(2) 该 BP 网络模型的输入参数是在一定试验条件下建立的,具有一定的适用范围,影响坡面径流量

的因素众多,如最大 30 min 降雨强度、降雨量、土壤质地、坡长、坡向等,在今后的研究中仍需深入探讨。

参考文献:

- [1] 舒畅,姜铁兵,蔡华等. 降雨—径流过程的 ANN 建模[J]. 水电能源科学,1999,17(2):56-58.
- [2] Dawson C W. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling[J]. Hydrological Science Journal,1998,43(1):47-66.
- [3] 鞠琴,郝振纯,余钟波. 基于人工神经网络的降雨径流模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(6):941-943.
- [4] 曹广学,张世泉. BP 模型在降雨径流预报中的应用研究[J]. 太原理工大学学报,2005,36(3):350-353.
- [5] 敖汝庄,王协康,黄尔,等. 坡面产流模式的神经网络模拟[J]. 泥沙研究,2000,8(4):55-58.
- [6] 任妮,金生. 基于改进 BP 神经网络的降雨径流预报新方法[J]. 中国水运,2006,6(12):119-122.
- [7] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工降雨装置[J]. 水土保持通报,1984,4(5):43-47.
- [8] 许全喜. 人工神经网络模型在流域水沙预报中的应用[J]. 人民长江,2000,31(5):30-32.
- [9] 武晟,解建仓,汪志荣,等. 典型下垫面径流系数预测的神经网络方法研究[J]. 环境科学与技术,2007,30(5):1-5.
- [10] 戴葵. 神经网络设计[M]. 北京:机械工业出版社,1999:23-34.
- [11] 刘耦耕,李圣清,肖强晖. 多层前馈人工神经网络结构研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2004,27(1):26-30.

(上接第 226 页)

- [14] 于格,鲁春霞,谢高地,等. 青藏高原草地生态系统服务功能的季节动态变化[J]. 应用生态学报,2007,18(1):47-51.
- [15] 李金昌,姜文来,靳乐山,等. 生态价值论[M]. 重庆:重庆大学出版社,1999.
- [16] 康文星,田大伦. 湖南省森林公益效能的经济评价(2): 森林的固土保肥、改良土壤和净化大气效益[J]. 中南林学院学报,2001,21(4):1-4.
- [17] 姜立鹏,覃志豪,谢雯,等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. 自然资源学报,2007,22(2):161-170.
- [18] 张伟,陈洪松,王克林,等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报,2008,24(1):68-73.
- [19] 李文华,欧阳志云,赵景柱. 生态系统服务功能研究[M]. 北京:气象出版社,2002.
- [20] Norgaard R B. Editorial: Ecological economics[J]. Bioscience, 2000,50:291.
- [21] Wang Xiaodan, Li Maihe, Liu Shuzhen, et al. Fractal characteristics of soils under different land-uses patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China[J]. Geoderma,2006,134:56-61.
- [22] 秦耀辰,刘凯. 分型理论在地理学中的应用研究进展[J]. 地理科学进展,2003,22(4):426-433.
- [23] 朱晓华,蔡运龙. 中国土地利用空间分形结构及其机制[J]. 地理科学,2005,25(6):671-677.
- [24] 盛学斌,孙建中,刘云霞. 坝上地区土地利用与覆被变化对土壤养分的影响[J]. 农村生态环境,2002,18(4):10-14.
- [25] CBD S. Handbook of the convention on biological diversity[M]. London: Earthscan Publications, 2001.
- [26] 赵军. 平原河网地区景观格局变化与多尺度环境响应研究[D]. 上海:华东师范大学,2008.
- [27] 温仲明,焦峰,张晓萍. 纸坊沟流域近 60 年来土地利用景观变化的环境效应[J]. 生态学报,2004,24(9):1903-1909.
- [28] Cynthia Croissant. Landscape patterns and parcel boundaries: an analysis of composition and configuration of land use and land cover in south-central Indiana [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 101(2/3):219-232.