

基于光谱混合分解的果园扩张特征与种植适宜性研究

肖 潇¹ 刘 明² 何奇瑾¹ 胡起源³ 高 翔³ 伦 飞³

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 雄安新区管理委员会自然资源和规划局, 河北 071700;
3. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: 以果园为代表的经济作物种植面积迅速扩张,其在获得一定经济收益的同时,也造成了一系列的生态环境问题。开展果园扩张及其演变特征研究,是助力果园生态可持续发展的重要内容。本研究以山东省烟台市苹果主产区栖霞市、莱阳市以及海阳市为研究区,基于线性光谱混合分解方法提取土地利用数据,分析了1998—2019年研究区果园种植面积变化情况,并结合扩张强度、扩张速率以及景观格局指数探析了当地果园扩张演变特征及其规律,进而通过种植适宜性评价体系,分析3个研究区果园种植适宜性分布情况。结果表明:研究期间,研究区果园呈持续扩张趋势,且明显分为快速扩张(1998—2010年)和平稳扩张(2010—2019年)两个阶段,其果园分别扩张409.25、684.71 km²;此外,约68.11%的果园扩张发生在北部栖霞市,这使当地形成以果园种植为主的农业经济发展模式。1998—2019年间,果园扩张主要来源为林地和耕地,其贡献率分别约为23.55%和55.52%;其中,一熟作物为主要耕地来源,其果园扩张贡献率高达42.51%,而裸地贡献率最低。2010年以后,研究区果园扩张由“填充式”转为“零散式”扩张,果园结构聚集度下降,破碎度增大;此外,果园扩张主要优先发生在高海拔以及山地,优先扩张区具有充足的气候资源与优良的自然地理条件,有利于苹果树生长发育。果园扩张达到一定规模时,会受海拔、坡度以及农村劳动力等因素的限制,逐渐向地形条件相对较差的地区扩张,可能造成果园收支不平衡现象和较大的潜在水土环境风险,当地政府应予以重视,并进一步加以控制。栖霞市的果园种植区整体种植适宜性较高,果园生长发育外部环境良好,尤其是气候条件;受土壤条件影响,莱阳市与海阳市果树种植区外部投入量相对较大。

关键词: 光谱混合分解; 果园扩张; 时空演变特征; 景观格局指数; 种植适宜性评价

中图分类号: S127; S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)03-0234-12 **OSID:** 

Expansion Characteristics and Planting Suitability Assessment of Orchard Based on Linear Spectral Mixed Decomposition

XIAO Xiao¹ LIU Ming² HE Qijin¹ HU Qiyuan³ GAO Xiang³ LUN Fei³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China
2. Bureau of Natural Resources and Planning of Administrative Committee of Xiongan New Area, Hebei 071700, China
3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The planting area of cash crops represented by orchards has expanded rapidly, which has not only obtained certain economic benefits, but also caused a series of ecological and environmental problems. Carrying out research on orchard expansion and its evolution characteristics is an important part of helping the sustainable development of orchards. Taking Qixia, Laiyang and Haiyang, the main apple producing areas in Yantai City, Shandong Province as the research areas, based on the land use data extracted by the linear spectral mixed decomposition method, the changes in the orchard planting area in the study area from 1998 to 2019 were analyzed. Combined with expansion intensity, expansion rate and landscape pattern index, the characteristics and laws of local orchard expansion and evolution were analyzed. The results showed that during the study period, orchard showed a continuous expansion trend, and it was clearly divided into two stages: rapid expansion (1998—2010) and stable expansion (2010—2019). The orchards were expanded by 409.25 km² and 684.71 km² respectively; in addition, about

收稿日期: 2022-05-16 修回日期: 2022-08-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(41801202,41911530693)
作者简介: 肖潇(1997—),女,博士生,主要从事土地生态和农业遥感等研究,E-mail: XXiaoNEVER@outlook.com
通信作者: 伦飞(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事土地生态研究,E-mail: lunfei@cau.edu.cn

68.11% of the orchard expansion occurred in Qixia, which led to the formation of an agricultural economic development model based on orchard planting. From 1998 to 2019, the main sources of orchard expansion were forest and cultivation, and their contribution rates were about 23.55% and 55.52%. Single cropping was the main source of cultivation, and the contribution rate of orchard expansion was as high as 42.51%, while bare land contributed the least. After 2010, the expansion of orchard in the study area was changed from filled to scattered, the degree of aggregation of the orchard structure was decreased, and the degree of fragmentation was increased. In addition, the expansion of orchard mainly occurred in high altitudes and mountains, and priority was given to expansion. The area had sufficient climatic resources and excellent natural geographical conditions, which were conducive to the growth and development of apple trees. When the orchard was expanded to a certain scale, it would be limited by factors such as altitude, slope and rural labor, and gradually expanded to areas with relatively poor terrain conditions, which may cause the orchard's unbalanced income and expenditure and greater potential water and soil environmental risks, the local government should pay attention. The overall planting suitability of orchard planting area in Qixia was high, and the external environment for orchard growth and development was good, especially climatic condition. Affected by soil conditions, the external input of fruit tree planting areas in Laiyang and Haiyang was relatively large.

Key words: spectral mixed decomposition; orchard expansion; spatial and temporal evolution characteristics; landscape pattern index; planting suitability assessment

0 引言

与传统粮食作物相比,经济作物有着较高的经济效益,这使得近二十年全球经济作物种植面积迅速扩张^[1-5],其中果园种植面积扩张尤为明显^[6-7]。以苹果为例,1977—2019 年全球苹果种植面积增加了 50%,2019 年达到了 $4.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。我国作为世界上最大的苹果生产和消费国,2018 年苹果产量高达 $3.92 \times 10^7 \text{ t}$,占世界苹果总产量的 46%,居世界第 1 位。我国果园种植面积的增加,在一定程度上提高了农户的经济收益;然而,以高农药化肥投入为特征的果园扩张严重地干扰了当地的生态环境,造成了景观格局和水文过程的变化^[8-9]、土壤侵蚀及酸化^[10]、温室气体排放增加^[11-12]、生物多样性减少^[13]、水体富营养化^[14-16]等问题。因此,研究果园扩张时空动态演变特征以及规律,对于更好地实现区域土地资源可持续利用,解决区域环境问题,具有重要的现实意义与理论价值。

近年来,国内外学者面向果园扩张时空演变特征开展了一定的研究^[17-19]。目前,果园扩张研究主要基于统计数据对柑橘、脐橙等果园种植时空演变进行研究,利用遥感技术分析果园扩张规律的研究成果不多,尤其是以中国北方山区苹果园为研究对象的文献较少。

随着遥感影像数据时空分辨率的不断提高,基于遥感技术动态监测果园种植面积逐渐成为学术界研究热点之一。大量已有研究基于地物光谱特征提取园地信息^[20-21],而其他研究则基于植被物候特征来绘制果园^[22-23]。然而,由于果树与自然林地的光

谱特征相似,且同一种树木光谱特征随时间及空间的变化而不同,因此,基于地物光谱特征差异提取果园精度受限,并且难以应用到其他地区。而基于植被物候信息的监测方法主要依赖于目标植被的先验物候知识以及遥感影像所能表征的物候差异信息,能够在时间和空间尺度传递,然而,该类方法通常需要借助雷达数据或是年内多期遥感影像数据,受数据数量和质量的限制,缺少对果园长期演变规律的研究。

线性光谱混合分解模型的理论假设为:传感器接收到的地面目标像元的辐射亮度值只与各组分所占的面积比例有关^[24],因此目标像元各个波段的反射率为像元内各端元在相应波段的反射率以其所占像元面积比例为权重的线性组合。根据像元光谱计算亚像元级的各标准端元(例如基质(S)、植被(V)、暗色物质(D)三端元)在像元内的面积百分比(即端元丰度值)^[25-26]。具有明确物理意义的端元丰度值能够更好地反映植被等景观要素的信息,这相较于其他传统分类理论来说,其分类精度相对更高^[25,27]。尤其在果园、林地等木本植物的分类制图中,对比传统单一的植被指数,以 SVD 为基础端元的光谱混合分解模型还能反映其冠层结构、密度等生物物理属性^[28-30],该方法已经在林地的制图中得到了广泛应用,并取得了较好的结果^[31-32]。与此同时,Landsat 4-8 系列卫星的重访周期为 16 d,并且有着较好的空间分辨率,并且 Landsat 系列数据记录了超过 40 a 的地球覆被及生态系统变化信息^[33-34],为根据果园的物候特征对其进行提取及其时空动态特征研究提供了数据基础。具有实际物理

意义的端元丰度值使得不同时期的影像产生的结果具有可比性^[35]。因此,本研究以 Landsat 系列遥感影像为数据源,应用光谱混合分解方法实现果园提取,从而服务于果园扩张演变规律研究。

烟台市果园种植产业起源于 1871 年,至今已有 150 多年的历史,是我国最早栽培苹果的地区之一。自 20 世纪 90 年代以来,当地政府通过鼓励果农种植苹果园、更新改造老龄果园计划、标准化苹果生产流程以及引进优良果种等政策,提升烟台苹果的品质与产量,与此同时,当地苹果种植面积也迅速扩大,到 2019 年,果园种植面积约为 3 420.56 km²,其中,栖霞市、莱阳市、海阳市是烟台市重要的苹果种植区,三市果园总面积约为 1 636.58 km²,占烟台果园总面积的 48%。因此,本研究选择栖霞市、莱阳市以及海阳市作为研究区域(以下简称为“栖霞海”),基于 Landsat TM 和 OLI 多年份多季遥感数据,采用线性光谱混合分解加决策树分类的方法,开

展果园扩张的遥感监测和种植适宜性分析,从而为区域资源利用效率以及果园可持续发展提供参考建议,为实现三市果园可持续种植提供支持。

1 研究区概况

研究区位于山东省烟台市南部(120°31′~121°29′E,37°5′~37°10′N),总面积约 5 482.63 km²,由栖霞市、莱阳市以及海阳市组成,北部栖霞市主要为果园种植区,南部莱阳市与海阳市主要以一熟作物种植为主(图 1)。研究区海拔为 0~783 m,地势多为低山丘陵,整体呈现北部高,南部低,地形起伏较为平缓,土壤质地以“中壤土”和“轻壤土”为主,大约占全域总面积的 80%。研究区属于暖温带东亚季风气候,四季分明,气候温和,年均日照总时数约为 2 341 h,年均积温约为 4 241℃,年均降雨量在 436~751 mm 之间,且多集中在 6 月下旬至 9 月上旬。

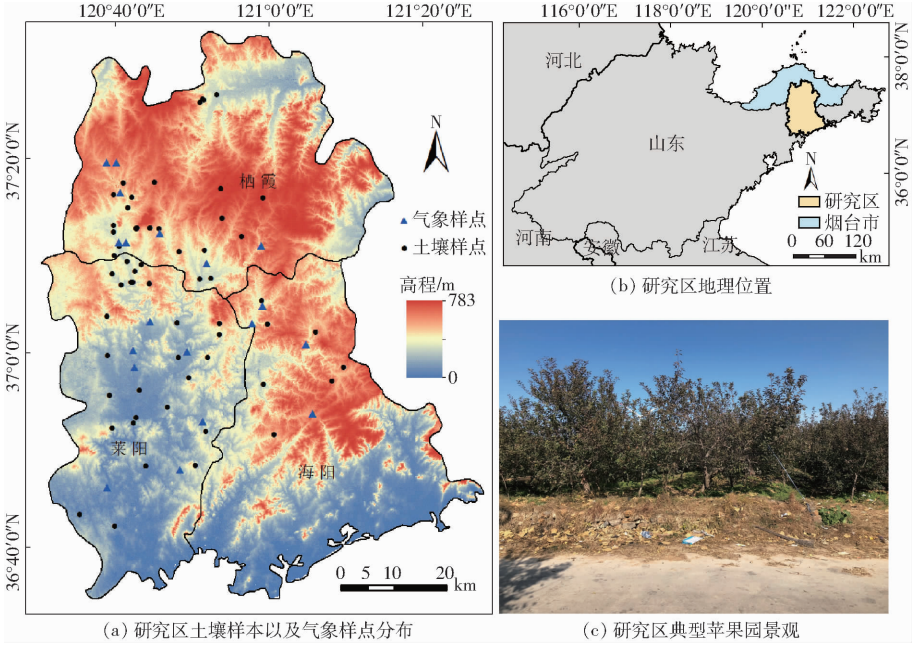


图 1 研究区概况

Fig. 1 Study area overviews

2 材料与方法

2.1 研究方法

2.1.1 基于线性光谱混合分解的土地利用覆被制图法

基于线性光谱混合分解制图法主要由线性光谱混合分解模型的构建与决策树的建立两部分组成。本研究采用主成分分析方法对各季相的光谱空间进行降维,检查不同年份各季相影像光谱空间的一致性,并确定端元的数量以及种类。全球非冰层陆地表面均可由 Landsat 系列数据光谱空间中基质(S表

示岩石和土壤)、植被(V表示光合作用叶片)和暗色物质(D表示阴影和水)3类通用端元进行表达^[26]。本文结合当地自然景观确定土壤、植被、水和暗色物质4类端元,构建研究区的光谱混合分解模型。

本研究根据研究区自然景观和土地利用特点,构建土地利用覆被分类体系(表1)和决策树(图2),得到研究区内 1998、2010、2015、2019 年的土地利用覆被情况,其中,WA 为水体端元丰度值;GV 为植被端元丰度值;DA 为暗色物质端元丰度值;SL 为土壤端元丰度值。决策树是一种常用的分类

方法,其结构清晰,适合分类知识组织以及不同区域之间、同一区域不同年份之间的分类对比及变化分析^[36]。构建决策树的关键在于节点分割变量的选择及分割阈值的确定:本文选取目标地类特征端元作为节点的分割变量,具有实际物理意义的端元丰度值作为分割阈值,分割阈值通过目标地类训练样本的端元丰度值直方图进行确定。

表 1 土地利用覆被分类
Tab.1 Land cover/use classes

地类	定义
水域	水覆盖区域,包括河流、水库、海洋
建设用地	居民点、交通、工矿等建设用地
灌/草地	包括灌木以及草本植物
两熟作物	一年种植两季作物,主要为小麦玉米轮作
一熟作物	一年种植一季作物,主要为春玉米和花生
林地	包括有林地和疏林地等
果园	主要为苹果树
裸地	没有生长植物且未被人类利用的裸露地表

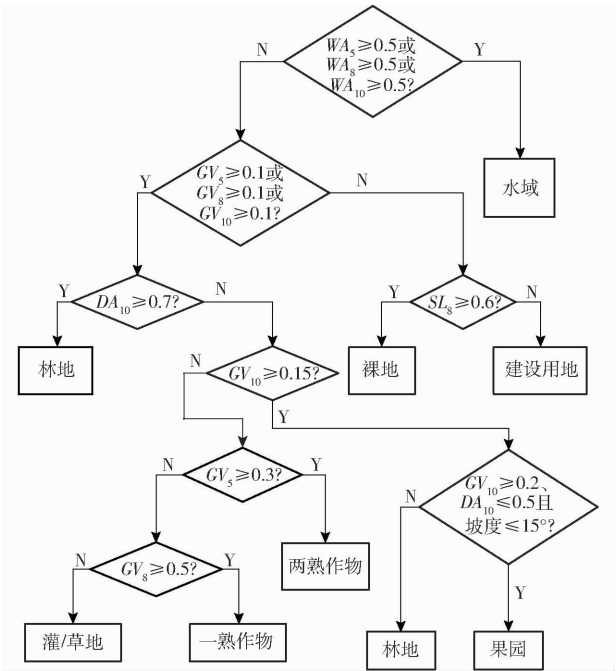


图 2 土地利用分类决策树

Fig. 2 Land use classification decision tree

2.1.2 果园扩张分析方法

土地利用转移矩阵是研究果园扩张变化情况以及主要扩张来源的重要方法。本研究基于 1998—2010 年和 2010—2019 年“栖霞海”土地利用转移矩阵,分析了不同时期研究区果园扩张变化情况以及主要来源。同时,以研究区自然地理为基础,进行分等单元果园种植面积统计,得到不同海拔、坡度以及种植适宜度的果园分布特征,探析了研究区果园扩张规律与潜在趋势。

果园扩张的速度和强度能直观展示研究区果园

扩张的变化情况。其中,果园扩张速率 S_{or} 定义为果园扩张面积的年增长速率,用以表征果园扩张的总体趋势。果园扩张强度 I_{or} 是利用各空间单元的果园面积对其每年的果园平均速度进行标准化处理,使不同时期果园扩张的速度具有可比性。具体计算公式为

$$S_{or} = \frac{\Delta A_{ij}}{\Delta t_{ij} A_{oij}} \times 100\%$$
 (1)

$$I_{or} = \frac{\Delta A_{ij}}{\Delta t_{ij} A_{tij}} \times 100\%$$
 (2)

式中 ΔA_{ij} ——第 j 期间第 i 个单元果园扩张面积, km^2
 Δt_{ij} ——时间间隔
 A_{oij} ——第 j 期间第 i 个单元初期果园面积, km^2
 A_{tij} ——第 j 期间第 i 个单元土地总面积, km^2

为了进一步科学客观分析研究区果园扩张的空间形态变化状况,本研究采用国内外广泛使用的 4 个景观格局指数定量分析果园扩张的空间变化特征,所有指数均由 Fragstats 4.2 软件计算。其中,斑块数量 (NP) 以及最大斑块指数 (LPI) 用于表征果园斑块数量以及单一图斑面积,其数值可以反映果园种植面积的扩张程度,斑块平均面积 (MPS) 以及聚集度指数 (AI) 用于表征果园的破碎化和聚集程度^[37],结合 4 个指数可以反映果园扩张在不同阶段的主要扩张形式。

2.1.3 果园种植适宜性评价方法

果树生长需要综合考虑果园种植区的水、热、光以及地形条件,大量研究表明^[38-39],果园种植最佳适宜条件为:年降水量 500 ~ 800 mm,年均温 9 ~ 12.5℃,年积温 2 800 ~ 3 600℃,夏季(6—9 月)温度日较差大于等于 10℃,年日照时数大于等于 2 500 h,土壤 pH 值 6.5 ~ 7.0。本文依据这 6 项苹果生长最佳标准,并基于曲衍波等^[39]构建的优质苹果生态适宜性评价指标体系,结合研究区生态环境与果园种植情况,采用层次分析法最终确定“栖霞海”苹果园种植适宜性评价指标体系(表 2)。

此外,本研究采用空间插值法、分段计分法与空间模拟建模法对各指标进行空间标准化处理。果园种植适宜度可以很直观地展示“栖霞海”苹果种植生态适宜条件,对讨论研究区苹果种植适应性空间差异以及合理规划优质苹果种植区具有积极作用。果园种植适宜度 S 的计算公式为

$$S = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i \right) W_j$$
 (3)

式中 W_j ——评价指标体系中一级评价指标权重

x_i ——评价指标体系中二级评价指标标准化值
 w_i ——评价指标体系中二级评价指标权重
 m ——评价指标体系中一级评价指标个数
 n ——评价指标体系中二级评价指标个数

表 2 果园种植适宜性评价指标体系
Tab.2 Orchard planting suitability evaluation index system

评价因子	指标	权重
地形因子 (0.197 6)	高程	0.181 0
	坡度	0.409 5
	坡向	0.409 5
土壤因子 (0.311 9)	土壤质地	0.538 9
	土壤 pH 值	0.297 3
	土壤有机质含量	0.163 8
气候因子 (0.490 5)	年降水量	0.120 9
	夏季(6—9 月)温度日较差	0.416 8
	≥10℃年积温	0.192 8
	年日照时数	0.269 5

2.2 数据来源及预处理

本研究需要的数据包括“栖霞海”的气象数据、土壤数据、地形数据以及遥感影像数据。

气象数据主要包括通过烟台市水文局收集的研究区内 18 个气象观测点 2012—2016 年日降水量数据与 4 个主要气象站点(观里站、大夼站、徐家店站、莱阳站)2012—2016 年日气温数据,并对数据进行处理得到 18 个气象观测点年均降水量与 4 个气象站点 5 年平均日较差;通过《山东烟台统计年鉴 2019 年》(<http://tjj.yantai.gov.cn/col/col118/index.html>)获取烟台市 9 个气象站点 2018 年日照时数;通过国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)获取 2019 年全国主要气象站点积温数据。

土壤数据由实地调研数据与土壤质地数据组成。2019 年 7、11 月,通过实地调研、取土、测定等方式采集了研究区 67 个采样点的土壤 pH 值、土壤有机质含量等信息(图 1)。所有土壤样品都选在深秋,即前一轮作物收获后,后一轮作物施肥前;每个土壤样点由 10 m×10 m 样方内 3 个不同点混合而成,农田与果园土壤样点采集深度分别为 0~20 cm、0~40 cm。

地形数据包含从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)获取的烟台市 30 m 空间分辨率的数字高程数据(Digital elevation model, DEM),以及基于 DEM 数据提取“栖霞海”坡度、坡向等地形信息。

遥感影像数据被用于提取研究区土地利用覆被数据,主要来源为美国地质勘探局(USGS)地球资源

观测科学中心(EROS,<http://glovis.usgs.gov/>)。其中土地利用数据主要采用 1998、2010、2015、2019 年表征研究区景观要素变化的春、夏、秋(5、8、10 月)3 个关键季相 Landsat 数据,影像已经经过几何精度校正和数字高程模型校正。此外,为了实现不同年份以及季相的遥感影像的辐射可比性,本文以经过大气校正后的 2010 年 5 月地表反射率影像为参考影像,应用伪不变特征法对其余的影像进行辐射归一化。

3 结果与分析

3.1 土地利用分类精度验证

本文利用验证样本创建混淆矩阵对 2015 年分类结果进行精度验证(图 3),结果表明:总体分类精度和 Kappa 系数分别为 91.21% 和 0.90,各地类的制图精度与用户精度基本达到 85% 以上,其中果园的制图精度和用户精度均在 90% 以上,这表明基于多季相端元特征的决策树分类方法在研究区土地利用覆被制图,尤其是在果园提取中的可靠性。基于具有实际物理意义的端元丰度值与研究区覆被季相变化规律相结合产生的分类知识是本研究分类精度较高的主要原因。但是研究区内灌木以及草本植物零星分布在各地类之间,其易被划分入其他用地类型中,这导致“灌/草地”用户精度较低(图 3)。此外,本研究将 2015 年分类结果中一熟作物与两熟作

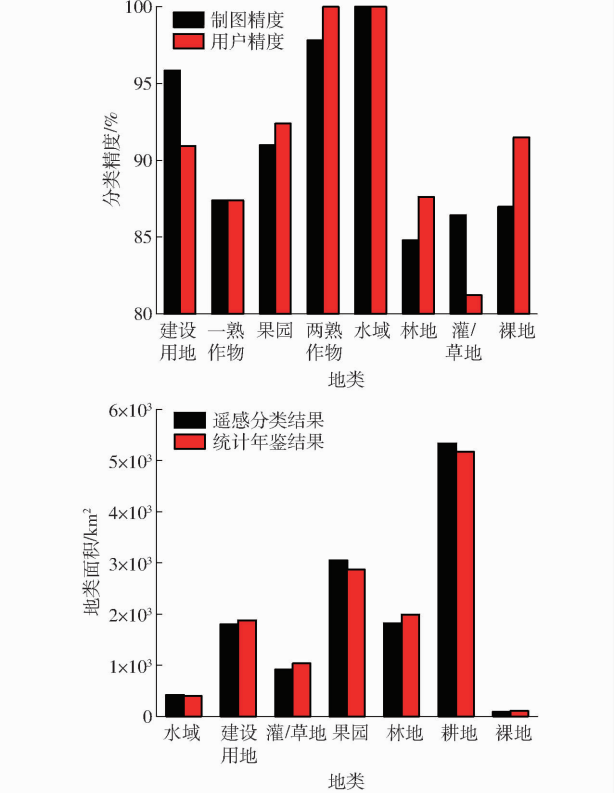


图 3 精度验证对比结果

Fig. 3 Classification accuracy

物合并为耕地,并与统计年鉴中各地类面积进行对比,各地类的误差百分比基本小于 10%,其中果园的误差百分比仅为 6.26%,这进一步证明了本分类结果在果园识别中的可靠性。

3.2 “栖霞海”果园扩张格局及其来源分析

3.2.1 “栖霞海”果园扩张的时空演变特征

研究发现,“栖霞海”果园种植面积呈显著持续增加趋势(图 4)。2019 年,“栖霞海”域内果园种植面积为 1 630.61 km²,比 1998 年果园种植面积(536.65 km²)高 1 093.96 km²,果园面积占比由 9.73% 增长到 29.55%,扩张近 3 倍。与此同时,果园扩张速度在整个研究期间分布不均匀,可以将其分为两个阶段:1998—2010 年,“栖霞海”正处于苹果种植热潮,全区果园扩张速度极快,约为 52.67 km²/年;而在 2010—2019 年间,受当地耕地保护与林地保护政策的影响,苹果种植热潮退去,果园种植产业开始平稳发展,在此期间,果园缓慢扩张,其他土地利用类型转化为果园的面积达 409.25 km²,扩张速度下降至 40.93 km²/年;扩张速率由 9.81% 降低至 3.35%,而扩张强度由 0.95% 减少为 0.74%,“栖霞海”22 年的平均扩张强度为 0.90%(表 3)。

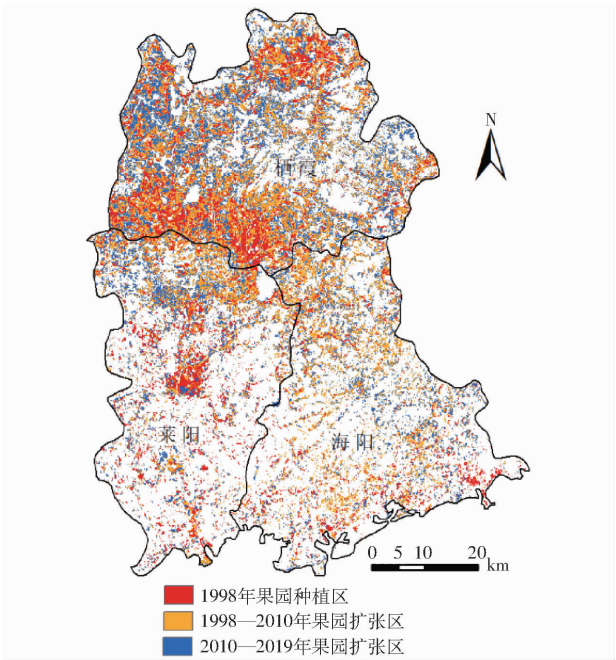


图 4 研究区果园扩张叠加图

Fig. 4 Orchard expansion superposed graphs of study area

表 3 1998—2019 年间果园扩张情况

Tab.3 Summary of orchard expansion from 1998 to 2019

时期	扩张面积/km ²	扩张速率/%	扩张强度/%
1998—2010 年	409.25	3.35	0.74
2010—2019 年	684.71	9.81	0.95
1998—2019 年	1 093.96	9.27	0.90

此外,研究区果园扩张呈显著的空间分异特征,即栖霞市、莱阳市和海阳市果园扩张差异明显(图 4)。其中,北部栖霞市果园种植面积扩张显著高于其他两市,其果园扩张约占全区扩张面积的 68.11%,当地果园面积占比由 13.55%(1998 年)扩张至 50.67%(2019 年),其扩张速率高达 12.44%,扩张强度为 1.69%;而莱阳市与海阳市果园扩张分散且较小,研究期间果园面积分别增加 171.52、177.22 km²,其中莱阳市果园扩张速率最小,仅为 4.76%。

3.2.2 “栖霞海”果园扩张来源分析

在 1998—2019 年间,“栖霞海”内果园扩张来源众多。从土地利用转移矩阵来看(图 5),耕地与林地是当地果园扩张的主要来源,其贡献率分别约为 55.52%、23.55%,其中,一熟作物则为主要耕地来源,果园扩张贡献率高达 42.51%;而裸地转出为果园最少,22 年间仅有约 0.306 km²的裸地转换为果园。此外,对比三期土地利用图发现,在 1998 年,与果园邻近的两熟作物大部分在 2019 年时转变为一熟作物(图 6)。与一熟作物相比较,两熟作物生长周期较短,需要人为管理频繁,投入劳力较多,因此,大量果园附近的两熟作物转变为一熟作物,这表明当地果农为保障较高经济的果园劳动投入,自行选择减少耕地劳动投入,即当地农户更倾向于将更多精力投入果园管理以提高经济收入,这一现象也间接证明了研究区早期果园扩张优先占用当地优质耕地。

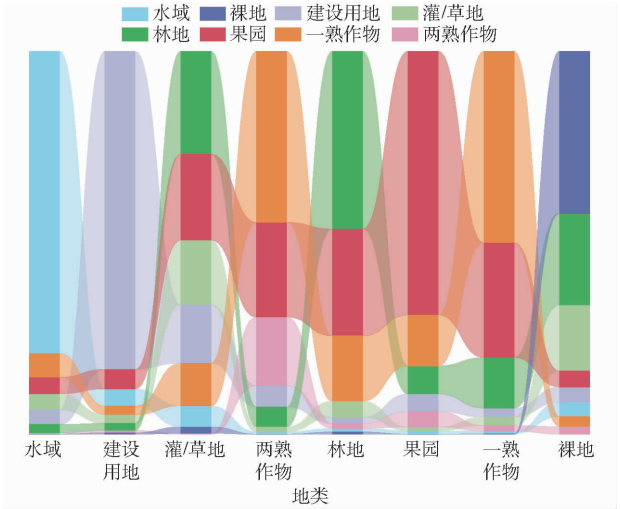


图 5 1998—2019 年“栖霞海”土地利用/覆被类型转移图

Fig. 5 Land use/cover type transition map in study area from 1998 to 2019

3.3 果园扩张演变规律分析

3.3.1 果园扩张景观格局演变分析

基于景观格局指数分析发现,1998—2019 年,“栖霞海”的斑块数量前期变化不大(在 5 000 ~

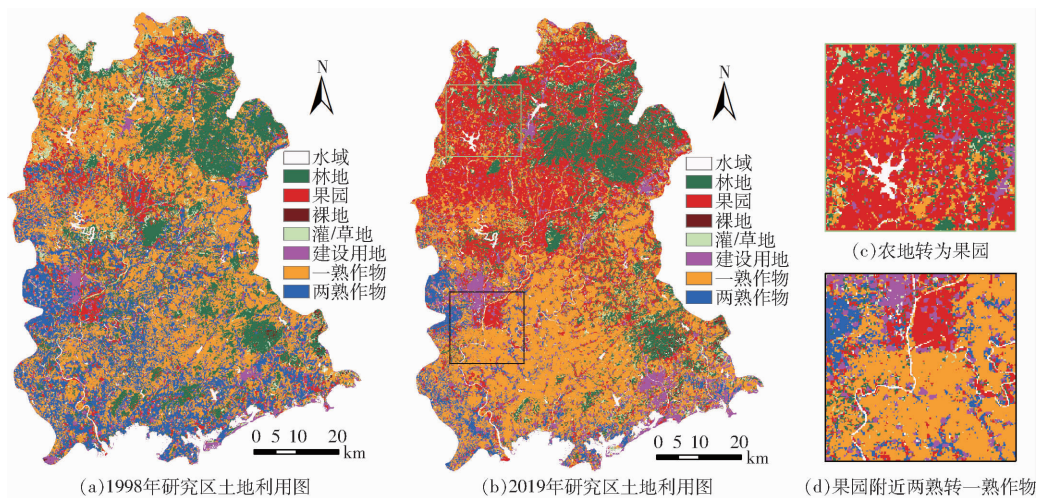


图 6 研究区土地利用分类图

Fig. 6 Land cover/use classification map of study area

6 600 个间上下波动), 后期迅速增大, 由 5 817 个 (2010 年) 增加至 11 352 个 (2019 年), 增加 1 倍左右, 而最大斑块指数则持续增大, 22 年间, 由 3.25% 提升至 54.23%, 这与当地果园扩张形式密切相关 (图 7)。1998—2010 年间, 当地果园以 1998 年连片果园为核心, 呈“蔓延式”或“填充式”的扩张方式; 而在 2010 年之后, 多以“零星式”的果园扩张方式为主。基于斑块平均面积与聚集指数的分析发现, 两者均呈现先增加后减少的趋势, 2010 年以后, “栖霞海”的斑块平均面积由 0.21 km² 减小至 0.14 km², 聚集度指数由 91.09% 下降至 90.81%, 这表明 2010 年以后“栖霞海”果园扩张在空间结构上呈现逐渐复杂的趋势, 果园斑块的破碎度增加, 也间接说明了

当地果园扩张形式的转变过程。

3.3.2 果园扩张地理演变分析

“栖霞海”果园扩张与自然地理呈现一定的规律性 (图 8)。从整体上来看, 在 1998—2019 年间, 果园种植面积曲线呈现明显向右移动的趋势, 这表明在研究期间, “栖霞海”全区果园扩张优先占领海拔较高以及坡度较大区域, 这与苹果交易市场上, 优质山地苹果更受消费者欢迎的趋势是相符合的。分别对比不同海拔和坡度区间的果园扩张趋势发现: 在海拔方面, 研究期间果园扩张速度最快的范围是 100 ~ 220 m, 约 65% 的果园扩张发生在该区域, 这其中又以海拔范围 150 ~ 220 m 最为集中, 深入分析发现, 海拔范围在 100 ~ 220 m 之

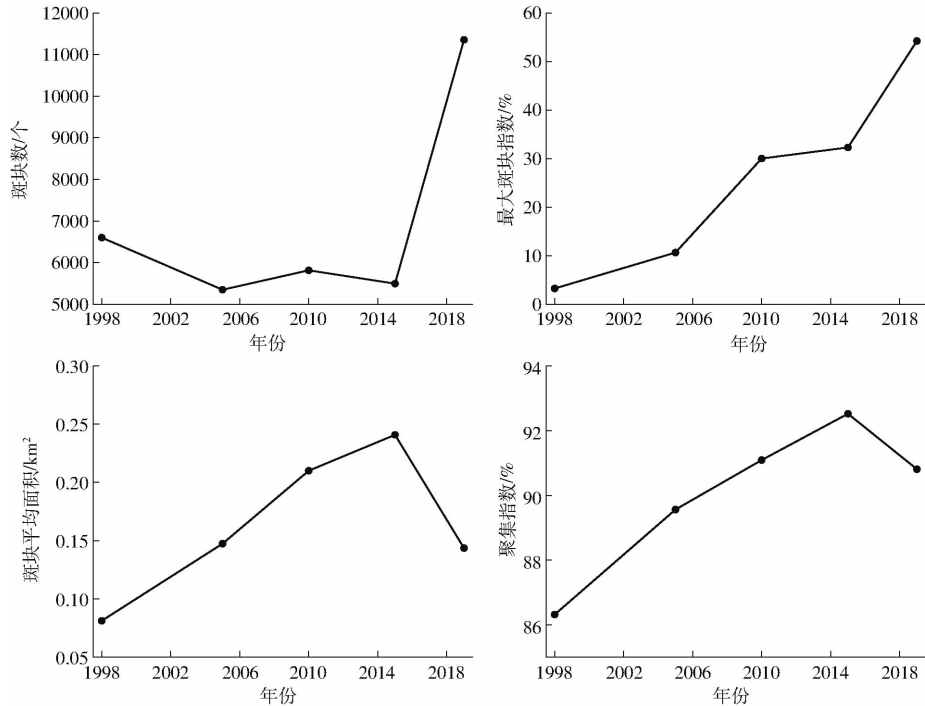


图 7 1998—2019 年研究区果园扩张景观格局变化情况

Fig. 7 Changes in orchard expansion pattern of study area from 1998 to 2019

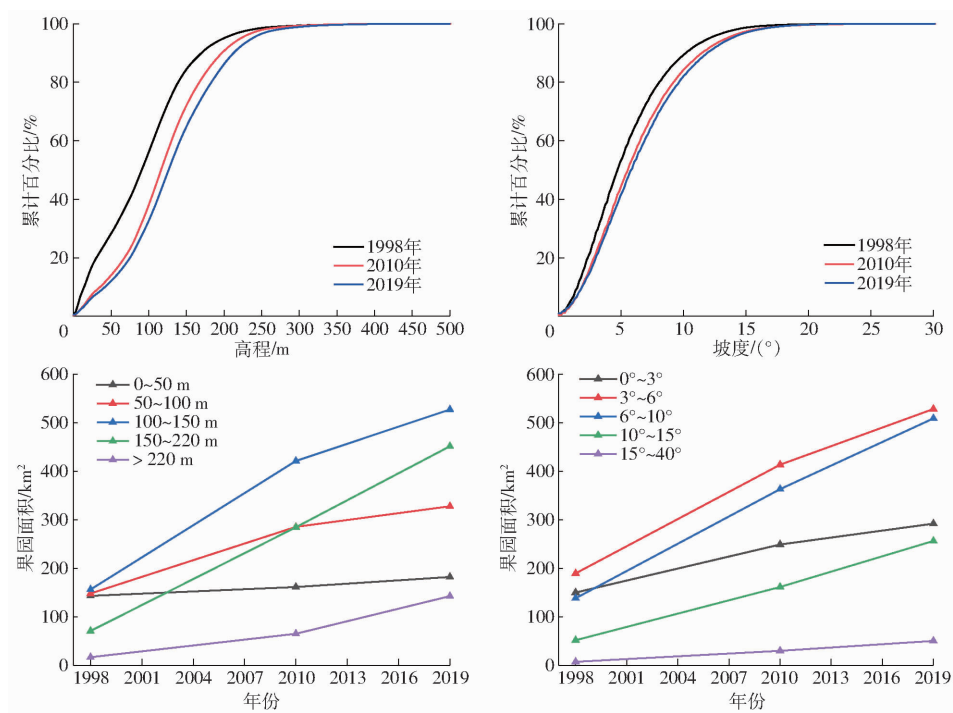


图 8 1998—2019 年果园海拔和坡度变化趋势

Fig. 8 Topographic trends of citrus orchard from 1998 to 2019 along elevation and slope

间的地区因其日照时间充足、降水量充足以及土壤条件适中等优良的自然地理以及气象条件,更适合苹果树的生长与发育,因此“栖霞海”的果农优先选择在此范围内大量种植苹果树;而在坡度方面,坡度带 6°~10°是果园扩张密集区域,且研究区果园正逐渐往高坡度地区扩张。由此可知,2010 年之前的果园多位于距离居民点较近且海拔较低的缓坡地区,之后向地形条件相对较差的地区进行扩张,而当其扩张达到一定规模时,开始受到海拔、坡度等地形因素以及农村劳动力等其他因素的限制,其增长速度变慢。

3.4 果园种植适宜性评价

3.4.1 果园种植适宜性分区结果

基于前文构建的苹果园种植适宜性评价体系,本研究计算出“栖霞海”苹果园种植适宜度(图 9),并以直方图自然频率突变点为依据,将“栖霞海”苹果种植适宜性分为 5 个等级(表 4)。从图中可以看出,“栖霞海”果园种植适宜性呈现显著的南北差异性。整体而言,受气候、土壤以及地形等自然地理条件的分布状况影响,与南部的莱阳市、海阳市相比较,北部栖霞市更加适合苹果树的生长与发育。分区统计结果表明,栖霞市整体苹果适宜性较高,约 58.28% 以上的苹果种植高度适宜区位于该市,而研究区约 93.93% 的苹果种植极度适宜区位于栖霞市,占栖霞市整体面积的 31.96%,此外,仅 1.71% 的苹果种植不适宜区位于栖霞市;与栖霞市相比,莱阳市与海阳市苹果种植适宜性较差,其中,“栖霞

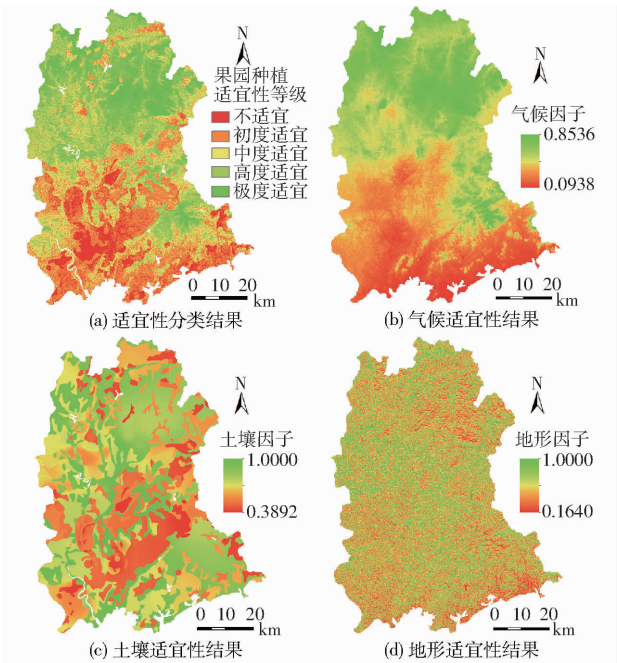


图 9 果园种植适宜性评价及其各维度结果

Fig. 9 Orchard planting suitability and its results of each dimension in study area

海”苹果种植不适宜区主要位于莱阳市与海阳市,约 49.87% 的苹果种植不适宜区位于莱阳市,约 45.32% 的苹果种植不适宜区位于海阳市,仅 4.12%、7.90% 的果园种植极度适宜区位于莱阳市与海阳市。从果园种植各维度适宜性评价结果可见,气候条件是栖霞市适宜种植苹果的主要优势条件,尤其是夏季温度日较差和降雨条件;而土壤条件则是莱阳市与海阳市发展苹果产业的重要制约因

素,其中,主要受土壤有机质含量与土壤 pH 值的影响较大。

表 4 果园种植适宜性等级及区间
Tab.4 Orchard planting suitability grade type zone value

种植适宜性等级	种植适宜性等级区间
不适宜	[0,0.453 3)
初度适宜	[0.453 3,0.513 0)
中度适宜	[0.513 0,0.568 0)
高度适宜	[0.568 0,0.622 9)
极度适宜	[0.622 9,1]

3.4.2 果园种植区适宜性评价

基于果园种植适宜性评价结果,对 2019 年研究区现存果园种植区进行种植适宜性分析,其结果如图 10 和表 5 所示。2019 年,3 市果园种植区整体适宜度较高,中度及以上适宜区面积约为 1 329.93 km²,占比 82.20%,不适宜区果园种植面积仅 75.28 km²,占果园种植总面积比例仅 4.65%。此外,与其余两市相比,栖霞市果园种植区适宜性较高,即果园种植适宜度较高的区域主要集中在栖霞市,适宜度较低区域则主要分布在莱阳市和海阳市。就果园种植极度适宜区而言,3 市果园种植区划分为该等级面积约 273.55 km²,其中约 251.05 km²集中在栖霞市,其占比高达 91.77%;而果园种植不适宜区在莱阳市与海阳市面积占比分别约为 53.32% 和 38.50%,仅 6.16 km²零散分布于栖霞市。

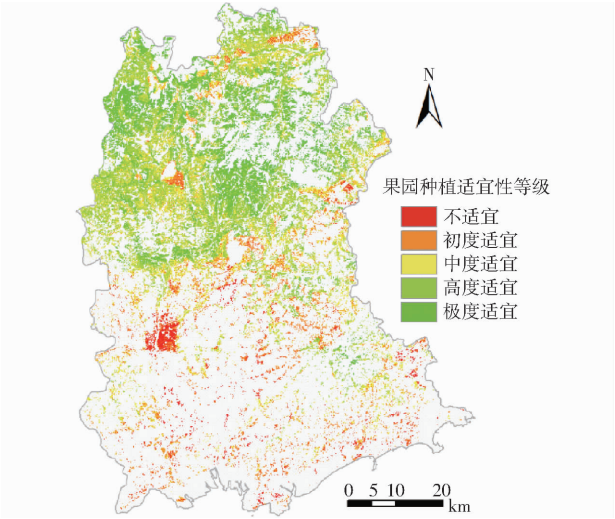


图 10 2019 年研究区果园种植适宜性评价结果
Fig.10 Results of evaluation of suitability of orchard planting in study area in 2019

具体而言,2019 年,栖霞市果园种植区的中度及以上适宜区面积比重最大,面积约 948.06 km²,占比 71.29%,而不适宜区面积比重最小,面积为 6.16 km²,仅占比 8.18%;海阳市果园种植区初度和中度适宜区面积比重较大,面积约 176.25 km²,占比

表 5 2019 年研究区果园种植适宜各等级实际种植面积
Tab.5 Orchard planting suitability grade area in 2019
km²

研究区	不适宜	初度适宜	中度适宜	高度适宜	极度适宜
栖霞市	6.16	56.65	221.50	475.52	251.05
莱阳市	40.14	69.49	106.73	99.67	14.97
海阳市	28.98	86.49	89.77	63.19	7.53
总计	75.28	212.63	418.00	638.38	273.55

27.95%,而极度适宜区面积比重最小,仅 7.53 km²,仅占比 2.75%;莱阳市不适宜区面积比重最大,面积 40.14 km²,占比高达 53.32%。2019 年各市果园种植区适宜性分布结果表明,栖霞市现存果园种植区整体种植适宜性较高,果园生长发育外部环境良好,海阳市次之,而莱阳市果园种植区土壤和气候条件相对较差,其果树种植外部投入成本相对较高。

近 20 年来,研究区大力发展苹果种植产业,形成了以果园种植为主的特色农业发展模式。然而,受气候、地形等条件的空间差异性影响,研究区内部苹果种植质量不匀。栖霞市是研究区主要的果园种植区,同时也是研究区最适合的苹果种植区域,因此,该市作为研究区果园种植核心区域,应该加大对当地果园种植产业的重视,尤其是在果园种植极度适宜区,可以通过调整苹果种类、加大投入等方式,提高果品质量与数量;而对于莱阳市与海阳市,当地现存果园种植适宜度较低,难以保证其经济效益,故应该逐渐实施果园退出计划,减少当地果园种植面积,调整农用地类型。

4 讨论

随着社会经济的不断发展,人们的饮食结构发生了一定的改变,水果的消费量不断增加,这使得全球果园种植面积不断增大,尤其是种植广泛的苹果园。全球约有 80 多个国家和地区正在大力推进苹果种植产业,2019 年全球苹果种植总面积达到 4.90 × 10⁴ km²[40]。而我国作为世界上重要的水果生产国和消费国,果园种植面积与产量均占全球 40% 以上,1992—2019 年间,我国苹果出口总额由 0.20 亿美元增长至 14.53 亿美元[41],苹果产业也成为我国重要的农业支柱产业之一,也是实现农民生活水平提高、助力乡村振兴的基础与保障[42]。因此,果园高产量与高质量的双高需求导致了“栖霞海”果园扩张的必然性与紧迫性,这也直接导致当地形成以果园种植为主要农业经济来源的生产模式。然而,由本文研究可知,随着果园种植面积逐渐扩大,当地果园种植高度及极度适宜区逐渐饱和,

“栖霞海”全区内果园正往种植适宜性较低区域扩张。因此,为寻求当地苹果种植经济可持续发展,可以借助苹果种植适宜性分区结果,将苹果最佳种植区域与最优苹果品种相匹配,以达到苹果生长发育最优条件,当地果农能获得苹果种植的最佳经济效益。

与其他国家相比较,我国果园种植的化肥和农药投入量较高^[43],但水果产量和果品质量却相对较低;此外,与传统农作物的种植管理模式相比较,果园种植过程中对于化肥、农药等需求量较大,尤其是烟台市苹果园种植模式,这在一定程度上对当地生态环境造成了压力^[44]。马文奇等^[45]认为这种高投入、低效益的果园种植方式严重干扰了我国生态系统的自我调节平衡能力,造成了生态破坏、土壤污染、水体富营养化等一系列问题。此外,赵旻等^[43]研究发现,2000—2016 年间,苹果种植导致我国苹果主产区面临着严重的水土环境压力,尤其是山东省。而本研究通过对 1998—2019 年间“栖霞海”苹果种植扩张变化特征的深入研究发现,当地果园种植面积暂未出现下降趋势,与此同时,尽管果园集中扩张于种植适宜性较高的栖霞市,但随着较高适宜区种植面积逐渐饱和,果园将逐渐往土壤肥力较低区域扩张,因此,本文认为当地果园种植区存在较大的潜在水土环境风险。此外,受水果较高经济效益以及当地经济发展需求,“栖霞海”难以在短时间内减少对果园种植产业的依赖,由此可见,当地由苹果种植导致的水土环境风险可能正在逐渐增加,急需提高对果园种植区水土环境风险的关注度,并进一步加以控制。因此,在厘清“栖霞海”果园扩张及其规律的基础上,建立当地果园种植适宜性分区,在保障果品产量与质量的同时,合理规划果园种植区,并采用绿色科学种植管理模式,是缓解“栖霞海”自然环境保护需求与经济发展需求之间冲突的有效方式,也是促进我国苹果主产区果园可持续利用与发展的重要方式,更是助力我国乡村振兴与农业产业发展的重要途径。

5 结论

(1)1998—2019 年,“栖霞海”全区果园呈持续扩张趋势,果园种植面积增加近 3 倍。受耕地与林地保护政策的影响,果园扩张过程可以分为两个阶段,一是处于果园种植热潮的快速扩张期(1998—2010 年),其扩张速度约为 52.67 km²/年,扩张面积约为 409.25 km²,二是 2010—2019 年的平稳扩张期,其果园扩张速度约为 40.93 km²/年,扩张面积为 684.71 km²;其中,约 68.11% 的果园扩张发生在栖霞市,其扩张速率与扩张强度远高于其他两市。

(2)耕地与林地是“栖霞海”果园扩张的主要来源,其贡献率分别约为 55.52% 和 23.55%,其中一熟作物贡献率占耕地总贡献率的 76.57%。研究期间,裸地转出为果园的占比最少,转换面积仅为 0.306 km²。此外,与耕地相比较,苹果种植的经济收益更高,因此,当地农户更倾向于种植果园以提高经济收入,这也导致了果园前期扩张优先占用当地优质耕地。

(3)1998—2019 年间,果园扩张与当地海拔和坡度均呈明显规律,即研究期间,果园优先占用高海拔、山地以及优质土地。优先占用区更利于苹果树的生长与发育,在交易市场能创造更高收益;此外,2010 年之前的果园多位于距离居民点较近且海拔较低的缓坡地区,而当其扩张达到一定规模时,开始受到海拔、坡度等地形因素以及农村劳动力等其他因素的限制,其增长速度变慢,并逐渐向地形条件相对较差的地区进行扩张,可能导致研究区果园经济效益的降低,并存在较大的果园种植潜在水土环境风险。

(4)“栖霞海”果园种植适宜性呈现显著的南北差异性。整体而言,受气候、土壤以及地形等自然地理条件的分布状况影响,与南部的莱阳市、海阳市相比较,北部栖霞市更加适合苹果树的生长与发育。2019 年,栖霞市果园种植区的中度及以上适宜区面积比重最大,占比 71.29%,而不适宜区面积比重最小,仅占比 8.18%。

参 考 文 献

- [1] ABRAM N K, MEIJAARD E, WILSON K A, et al. Oil palm-community conflict mapping in Indonesia: a case for better community liaison in planning for development initiatives[J]. Applied Geography, 2017, 78: 33 – 44.
- [2] CASTIBLANCO C, ETTER A, AIDE T M. Oil palm plantations in Colombia: a model of future expansion[J]. Environmental Science & Policy, 2013, 27: 172 – 183.
- [3] GATTO M, WOLLNI M, QAIM M. Oil palm boom and land-use dynamics in Indonesia: the role of policies and socioeconomic factors[J]. Land Use Policy, 2015, 46: 292 – 303.
- [4] ZHANG L, KONO Y, KOBAYASHI S. The process of expansion in commercial banana cropping in tropical China: a case study at a Dai village, Mengla county[J]. Agricultural Systems, 2014, 124: 32 – 38.
- [5] ZHANG L, KONO Y, KOBAYASHI S, et al. The expansion of smallholder rubber farming in Xishuangbanna, China: a case study of two Dai villages[J]. Land Use Policy, 2015, 42: 628 – 634.

- [6] FOX J, VOGLER J B. Land-use and land-cover change in montane mainland southeast Asia[J]. *Environmental Management*, 2005, 36(3): 394–403.
- [7] XIAO Rui, SU Shiliang, MAI Gengchen, et al. Quantifying determinants of cash crop expansion and their relative effects using logistic regression modeling and variance partitioning[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 258–263.
- [8] SU Shiliang, YANG Chenxue, HU Yina, et al. Progressive landscape fragmentation in relation to cash crop cultivation[J]. *Applied Geography*, 2014, 53: 20–31.
- [9] YI Zhuangfang, CANNON C H, CHEN Jin, et al. Developing indicators of economic value and biodiversity loss for rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China: a case study from Menglun township[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 788–797.
- [10] XIAO H F, TIAN Y H, ZHOU H P, et al. Intensive rubber cultivation degrades soil nematode communities in Xishuangbanna, southwest China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 161–169.
- [11] CARLSON K M, CURRAN L M, RATNASARI D, et al. Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion in west Kalimantan, Indonesia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7559–7564.
- [12] PETSRI S, CHIDTHAISONG A, PUMIJUMNONG N, et al. Greenhouse gas emissions and carbon stock changes in rubber tree plantations in Thailand from 1990 to 2004[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 52: 61–70.
- [13] AHREND S, HOLLINGSWORTH P M, ZIEGLER A D, et al. Current trends of rubber plantation expansion may threaten biodiversity and livelihoods[J]. *Global Environmental Change*, 2015, 34: 48–58.
- [14] CHEN Zhujun, WANG Lei, WEI Ansheng, et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1097–1104.
- [15] DEMESTIHAS C, PLENET D, GENARD M, et al. A simulation study of synergies and tradeoffs between multiple ecosystem services in apple orchards[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236: 1–16.
- [16] 张慧敏, 徐秋桐, 章明奎. 水土保持措施降低河网平原区果园地表氮磷铜流失[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 132–138. ZHANG Huimin, XU Qitong, ZHANG Mingkui. Application of different management measures to reduce runoff losses of nitrogen, phosphorus and copper from orchard in dense river network plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(2): 132–138. (in Chinese)
- [17] 陈优良, 胡锦涛, 王兆茹, 等. 赣南柑橘果园面积动态变化分析——以信丰县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(5): 884–894. CHEN Youliang, HU Jinjing, WANG Zhaoru, et al. An analysis of the dynamic changes in the area of orange orchard in south Jiangxi Province: a case study in Xinfeng County[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(5): 884–894. (in Chinese)
- [18] 林正雨, 邓良基, 陈强, 等. 四川省柑橘生产格局变化及驱动因素[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(11): 2591–2604. LIN Zhengyu, DENG Liangji, CHEN Qiang, et al. Analysis on change of citrus production patterns and driving factors in Sichuan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(11): 2591–2604. (in Chinese)
- [19] 王斌, 何丙辉, 林娜, 等. 奉节县脐橙果园用地时空演变特征与驱动因子分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 204–214. WANG Bin, HE Binghui, LIN Na, et al. Spatial and temporal evolution of navel orange orchard land and its driving factors in Fengjie County[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 204–214. (in Chinese)
- [20] DIBS H, OLUDARE I M, AHMED A G B. Hierarchical classification approach for mapping rubber tree growth using per-pixel and object-oriented classifiers with SPOT-5 imagery[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2017, 20(1): 21–30.
- [21] DALPONTE M, BRUZZONE L, GIANELLE D. Tree species classification in the southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 258–270.
- [22] DONG Jinwei, XIAO Xiangming, CHEN Bangqian, et al. Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 392–402.
- [23] LI Longwei, LI Nan, LU Dengsheng, et al. Mapping moso bamboo forest and its on-year and off-year distribution in a subtropical region using time-series Sentinel-2 and Landsat 8 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111265.
- [24] SETTLE J J, DRAKE N A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1159–1177.
- [25] ADAMS J B, SABOL D E, KAPOS V, et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(2): 137–154.
- [26] SMALL C, MILESI C. Multi-scale standardized spectral mixture models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 442–454.
- [27] CAMACHO-DE C F, GARCIA-HARO F J, GILBERT M A, et al. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(17): 3451–3476.
- [28] ASNER G P, BATESON C A, PRIVETTE J L, et al. Estimating vegetation structural effects on carbon uptake using satellite data fusion and inverse modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28839–28853.

- [29] HALL F G, SHIMABUKURO Y E, HUENNRICH K F. Remote-sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(4): 993 – 1013.
- [30] PEDDLE D R, BRUNKE S P, HALL F G. A comparison of spectral mixture analysis and ten vegetation indices for estimating boreal forest biophysical information from airborne data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001, 27(6): 627 – 635.
- [31] LU Dengsheng, MORAN E, BATISTELLA M. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(4): 456 – 469.
- [32] SONNENTAG O, CHEN J M, ROBERTS D A, et al. Mapping tree and shrub leaf area indices in an ombrotrophic peatland through multiple endmember spectral unmixing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 342 – 360.
- [33] WULDER M A, WHITE J C, LOVELAND T R, et al. The global Landsat archive: status, consolidation, and direction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 271 – 283.
- [34] ZHU Zhe. Change detection using landsat time series: a review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 370 – 384.
- [35] SUN Danfeng. Detection of dryland degradation using Landsat spectral unmixing remote sensing with syndrome concept in Minqin County, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 41: 34 – 45.
- [36] RODRIGUEZ-GALIANO V F, CHICA-RIVAS M. Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and digital terrain models[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(6): 492 – 509.
- [37] 胡盼盼, 李锋, 胡聃, 等. 1980—2015 年珠三角城市群城市扩张的时空特征分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 7063 – 7072.
- HU Panpan, LI Feng, HU Dan, et al. Spatial and temporal characteristics of urban expansion in Pearl River Delta urban agglomeration from 1980 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 7063 – 7072. (in Chinese)
- [38] 万炜, 师纪博, 刘忠, 等. 栖霞市苹果园氮磷养分平衡及环境风险评价[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 211 – 219.
- WAN Wei, SHI Jibo, LIU Zhong, et al. Nitrogen and phosphorus nutrient balance and environmental risk assessment of apple orchard in Qixia City[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(4): 211 – 219. (in Chinese)
- [39] 曲衍波, 齐伟, 赵胜亭, 等. 胶东山区县域优质苹果生态适宜性评价及潜力分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 109 – 114.
- QU Yanbo, QI Wei, ZHAO Shengting, et al. Ecological suitability evaluation and potential analysis of top-quality apple in Jiaodong mountainous areas at county level[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(6): 109 – 114. (in Chinese)
- [40] 王利民, 刘佳, 高建孟. 中国苹果空间分布格局及年际动态变化分析[J]. *中国农业信息*, 2019, 31(4): 84 – 93.
- WANG Limin, LIU Jia, GAO Jianmeng. Analysis of spatial pattern and interannual dynamics of apple planting area in China [J]. *China Agricultural Informatics*, 2019, 31(4): 84 – 93. (in Chinese)
- [41] 苏珊珊, 霍学喜. 全球苹果贸易网络结构特征及中国地位变迁分析[J]. *农业经济问题*, 2020(6): 99 – 109.
- SU Shanshan, HUO Xuexi. Analysis on the changes of structural characteristics of global apple trade network and the transition of China's status[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2020(6): 99 – 109. (in Chinese)
- [42] 张正峰. 面向 SDGs 的土地可持续利用目标、挑战与应对策略[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(10): 48 – 55.
- ZHANG Zhengfeng. Sustainable land use goals, challenges and countermeasures in China for SDGs[J]. *China Land Science*, 2019, 33(10): 48 – 55. (in Chinese)
- [43] 赵畅, 李卓, 刘明, 等. 中国苹果主产区 2006—2016 年磷元素收支及其环境风险变化[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(12): 2779 – 2787.
- ZHAO Yang, LI Zhuo, LIU Ming, et al. Phosphorus budgets and their associated environmental risks in the main apple orchard areas in China from 2006 to 2016[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2779 – 2787. (in Chinese)
- [44] 陈毅凡, 吴天昊, 韩熙睿, 等. 山东烟台苹果施肥现状调查[J]. *中国果树*, 2021(7): 91 – 95.
- CHEN Yifan, WU Tianhao, HAN Xirui, et al. Investigation of fertilization status of apples in Yantai, Shandong Province[J]. *China Fruits*, 2021(7): 91 – 95. (in Chinese)
- [45] 马文奇, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展理论框架和实现路径的思考[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(8): 1103 – 1112.
- MA Wenqi, MA Lin, ZHANG Jianjie, et al. Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1103 – 1112. (in Chinese)