

## 2000 年以来天目湖流域茶园分布变化及趋势模拟\*

刁亚芹<sup>1,2</sup>, 韩莹<sup>1,2</sup>, 李兆富<sup>3</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 土地利用/土地覆被变化(LUCC)与区域的可持续发展密切相关,分析土地利用变化及其空间变量的关系,建立模拟模型来认识和揭示土地利用变化的特征和时空分布规律,为未来规划和政策的制定提供支持是LUCC研究的重点问题之一。本研究以太湖流域上游典型丘陵山区茶园开发作为重点研究对象,结合中高分辨率遥感影像信息、1:50000 国家标准地形图数据和野外土壤采集分析数据获取 2000 年以来茶园及其它土地利用信息、研究区地形地貌数据和土壤数据,通过对 2000 年以来茶园及其新开茶园的区位分布分析,发现茶园的变化呈现快速增长的趋势,11 年研究区茶园面积扩大了 5 倍,其中一半以上的面积是最后 3 年增长的;茶园在流域上不同分区的分布差异比较大,这些差异与分区自然条件、区位条件和开发条件有一定关系。根据 Cramer V 卡方检验结果值,比较不同的茶园区位影响因素对茶园分布的影响力,确定高程、坡度、水库、河流、村落、主干道路和茶园规模对茶园区位影响比较显著。用茶园区位影响显著性的 7 个因子通过迭代优化建立 MLP 神经网络模型,对研究区的未来茶园的分布区位进行模拟,并且用已开发茶园对模型进行验证,达到 84% 的区位预测精度。基于模型用现有茶园开发模式、2000 年左右茶园开发模式和折中模式 3 种情景模拟未来茶园的分布,发现按现有的茶园开发速度,2020 年茶园总面积将达到流域总面积的 1/4,任何一种情景都改变不了茶园在重要功能区的快速增长趋势,因此迫切需要政府采取相应的措施对茶园面积的增长和区位的分布进行控制。

**关键词:** 天目湖流域;土地利用;茶园;时空特征;神经网络模型;情景预测

## Spatio-temporal change of tea plantation since 2000 and model-based prediction in the Tianmuhu Reservoir watershed

DIAO Yaqin<sup>1,2</sup>, HAN Ying<sup>1,2</sup> & LI Zhaofu<sup>3</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Institute of Resource and Environment of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China*)

**Abstract:** Land use/cover change (LUCC) is closely related to regional sustainable development. It is an important issue in LUCC investigations to analyze the relationship between land use change and its influencing variables on spatial scale, to reveal the change in land use and its spatio-temporal distribution characteristics by developing a simulation model, and to support the future decision-making. This study took the Tianmuhu Reservoir watershed, the land use of which has been changed rapidly with the dominant cash crop of tea plantation in upstream of the Lake Taihu basin, as the study area. Interpretation of the high-resolution remote sensing imagery provided the data of tea plantation and other land uses since 2000. Topography and soil data were obtained from the 1:50000 scale national standard relief map and soil sampling with laboratory analysis, respectively. Analyses of the spatial distribution and area change of existing and newly-exploited tea plantation since 2000 revealed that the tea plantation area was in a rapidly increasing trend. The tea plantation area expanded 5 times in the past 11 years and half of those increased in the last 3 years.

\* 国家自然科学基金重点项目(41030745)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-04)、中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目(NIGLAS2012135005)、江苏省自然科学基金项目(SBK200920953)和溧阳市沙河水库管理处科研项目联合资助。2013-03-19 收稿;2013-04-28 收修改稿。刁亚芹,女,1987 年生,硕士研究生; E-mail: mobing0503@163.com.

There was a big difference in the spatial distribution of tea plantation among sub-regions, because of their different natural backgrounds, geographical factors and suitability conditions for tea plantation. The results of Cramer V chi-square test showed that elevation, slope, reservoirs, rivers, villages, roads and the scale of tea garden were the most significant factors for the spatial distribution of tea plantation. The MLP neural network model for the prediction of tea plantation was developed through iterations based on the seven significant influencing factors. It was validated using the area of existing tea plantation, the performance of which reached to 84%. Application of the model in predicting the future spatial distribution of tea plantation under current, 2000, and the compromised tea-exploitation mode displayed that the area of tea plantation in 2020 will account for 1/4 of the watershed area if it is exploited following the current pace. None of the three scenarios could change the growing trend of tea plantation. Therefore, it is urgent to push the local government to take corresponding strategies and measures to control the increasing area of tea plantation and adjust its spatial distributions

**Keywords:** Tianmuhu Reservoir watershed; land use; tea plantation; spatio-temporal distribution; ANN model; scenario prediction

我国东南湿润区地形以丘陵山区为主<sup>[1]</sup>, 水热组合条件优越<sup>[2]</sup>, 植被覆盖度高, 在区域供水和生态安全方面发挥着重要的功能. 近年来随着社会经济的发展, 过快的城市化使得耕地大幅度减少, 人地关系日益紧张. 地方政府为了保证农业持续发展, 纷纷出台引导和鼓励丘陵山区农业开发的政策, 加大丘陵山区综合农业的开发并成为该区土地利用变化的主要趋势. 丘陵地区地形坡度大, 大面积的开发造成山区地表森林覆盖度减小、水土流失加剧, 自然生态受到破坏, 严重危及到该区的供水和生态安全.

土地利用/覆被变化(LUCC)是人类作用于自然界的最直接表现<sup>[3-4]</sup>, 是全球变化的主要组成部分和主要原因, 与可持续发展密切相关<sup>[4-6]</sup>, 自1995年IGBP和IHDP两大国际组织共同拟定并发表了《土地利用与土地覆被变化科学研究计划》以后, LUCC日益受到国际组织和世界各国的普遍关注, 成为国际全球变化研究的重要领域和前沿问题<sup>[7-8]</sup>. 我国也进行了许多相关的LUCC研究<sup>[9-12]</sup>, 但是以往的土地利用/土地覆被变化关注较多的是城市扩展问题, 已经建立多个时间段土地利用/土地覆被变化信息, 研究城镇的时空变化特征, 并揭示人口及其经济增长对城市化的驱动机制和产生的影响<sup>[13-15]</sup>. 由于丘陵山区林地向茶果园的土地利用转换方式较少受到关注, 同时因丘陵山区斑块破碎度高, 目前土地利用变化采用的中等分辨率遥感数据难以提取其变化信息<sup>[16]</sup>, 至今针对丘陵山区茶果园开发驱动的土地利用变化尚缺乏系统分析.

本研究以太湖流域上游的天目湖丘陵山区作为代表性区域, 结合近年来高分辨率遥感信息, 解译获取研究区2000年以来6个时段土地利用序列信息, 重点分析该流域茶园开发的时空变化特征; 然后综合应用GIS空间分析、Cramer V卡方检验等方法, 揭示天目湖地区茶园分布变化的驱动机制, 最后建立天目湖流域的茶园开发MLP模拟模型进行情景模拟, 分析其未来可能的趋势, 为理解东南丘陵山区土地利用变化的机制提供案例.

## 1 研究区概况

天目湖流域位于江苏溧阳和安徽广德、郎溪境内, 为太湖上游丘陵山区, 属天目山余脉, 地貌类型多样, 以低山丘陵为主, 高程主要分布在2~541 m, 流域面积246 km<sup>2</sup>, 拥有沙河水库和大溪水库两座国家级大型水库, 流域面积分别为154和92 km<sup>2</sup>. 该流域的主要土地利用/覆被类型包括: 农田、林地、茶园、水体等. 依据2011年天目湖流域的土地利用解译数据统计, 林地是天目湖流域最主要的土地用地类型, 面积占37.7%; 茶园是丘陵最重要的农业开发类型, 面积位居第三, 为26.9 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的10.9%. 地带性土壤为黄棕壤, 微酸性, 保水保肥性差, 易被水冲刷导致水土流失, 山间谷地分布有渗育型水稻土. 天目湖地区是东南湿润区丘陵山区农业综合开发的代表性区域, 集供水、旅游和农业于一体. 天目湖水库(沙河水库与大溪水库)是我国首批AAAA风景区, 农业以发展名优茶业为主, 承担了溧阳市60万人口供水, 然而近年来的发展已经危机到区域生态与供水安全.

## 2 研究数据和方法

### 2.1 技术框架

本研究首先综合高分辨率遥感影像数据、1:50000国家标准地形图数据和植被覆盖及野外考察资料, 通

过标准化处理、解译、GIS空间分析等建立土地利用变化序列数据库和土地利用变化影响因素的数据库(包括高程、坡度、水库距离、道路距离、村落距离、河流距离、新老茶园距离、总氮、总磷、有机质)。其次通过土地利用变化数据序列及其影响因素的叠加与统计,分析2000年以来天目湖地区的土地利用时间变化特征和空间分布特征。运用Cramer V卡方检验的方法,评价不同因素对茶园分布的影响程度,并筛选出土地利用分布的关键影响因素,基于关键影响因素和土地利用变化特征,建立茶园开发MLP神经网络模拟模型,并用已有的茶园增长数据对茶园开发MLP神经网络模拟模型的预测结果进行验证。最后基于模拟模型,设置茶园开发的不同的情景,模拟未来茶园变化的趋势(图1)。

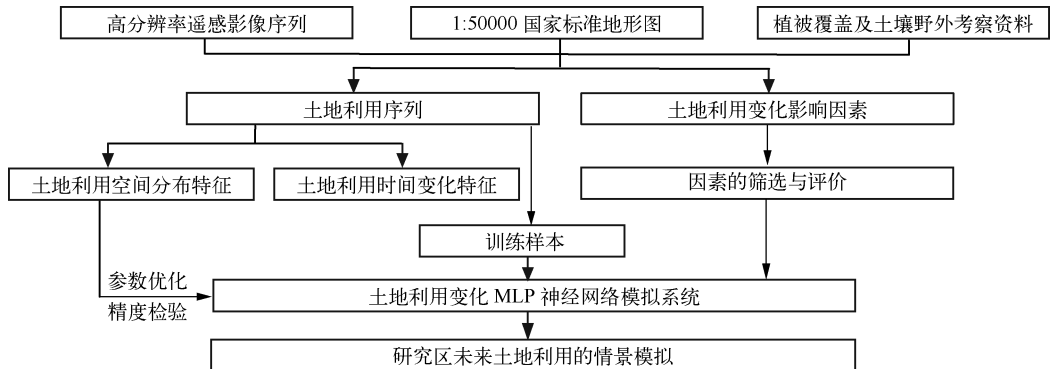


图1 土地利用变化时空变化分析及其模拟模型建立技术流程

Fig. 1 The flow chart of analysis in land use space-time change and prediction model

## 2.2 数据基础

依据茶园的分布特点以及不同时期数据的可比性,解译不同年份土地利用尽量选择空间分辨率接近的数据源,通过Spot5(2002,10 m)、ALOS(2008,2010,10 m)、RapidEye(2011,5 m)和ETM(2000,2005,15 m)遥感解译,共获取6个时期的数据。土地利用类型参考国家标准土地利用分类系统并结合该区的实际情况,主要分为林地、耕地、茶园、水体、草地、建设用地、裸地、河湖湿地、退耕地。高程和坡度数据采用1:50000 25 m国家标准地形图通过地形分析获取。水库、河流、道路、村落信息采用国家1:50000标准地形图数字化,并通过中高分辨率遥感影像纠正获取,与以上要素的距离采用GIS的邻距分析获取。土壤数据以1:200000土壤类型分布图为基础,针对主要土地利用类型和土壤类型采集60个土壤样品进行实验室分析,建立该区土壤速效氮、速效磷和有机质分布3个影响因子的最新数据。茶园距离变量主要是对高分辨率遥感影像提取的现有茶园分布进行邻距分析获取,用于茶园规模扩张的表达。

## 2.3 茶园分布影响因素评价

2.3.1 Cramer V卡方检验 为了准确地评价影响茶园分布的关键性因素,本研究用Cramer V卡方检验来量化茶园在空间变量上分布概率的差异性。卡方检验根本思想就是在于比较理论频数和实际频数的吻合程度或拟合优度问题<sup>[16]</sup>。Cramer V卡方检验的值表达为:

$$\text{Cramer V} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \cdot \min[(r-1), (s-1)]}} \quad (1)$$

式中, $\chi^2$ 表示卡方检验结果, $r,s$ 分别表示行、列数, $n$ 为样本数<sup>[17]</sup>。

评价因子Cramer V值越大,说明该评价因子空间差异与茶园分布的关联性越大;反之,Cramer V指数越小,说明评价因子空间差异与茶园分布的关联性越小。一般情况下,Cramer V指数在0.4以上时,空间变量对茶园分布有重要的影响;Cramer V指数在0.2~0.4时,影响因子对茶园的分布有影响;Cramer V指数小于0.2时,影响因子对茶园的分布影响可以忽略<sup>[18]</sup>。

2.3.2 影响因素及其评价结果 研究在总结分析典型用地类型茶园种植相关文献<sup>[19-22]</sup>及实地访谈的基础上,重点从茶园种植的自然条件和具备的开发条件两个方面选择合适的区位影响指标,考虑地形地貌指标、

表1 茶园分布影响因子和空间变量表达及其评价结果  
Tab.1 The tea plantation distribution relation factors and its  
Cramer V chi-square test results

影响条件	因素指标类型	指标空间变量表达	Cramer V 卡方检验值
自然条件	地形地貌指标	高程	0.587
		坡度	0.403
	土壤指标	速效氮	0.155
		速效磷	0.149
		有机质	0.123
开发条件	其他指标	到河流的距离	0.227
	区位指标	到水库距离	0.420
	可达性指标	到主要道路距离	0.254
		到主要村落的距离	0.217
	规模指标	到已开发茶园的距離	0.313

土壤指标、区位指标、可达性指标和规模指标等共 10 个影响因子(表 1)分析茶园区位分布。

从 10 个因子的 Cramer V 卡方检验结果值看,地形地貌直接决定茶园能否种植,是茶园开发自然适宜性的控制性因子,与地形地貌密切相关的坡度和高程卡方值均达到 0.4 以上,尤其是坡度,卡方值达到 0.587. 水库距离对茶园分布的影响力仅次于坡度因子,卡方值达到 0.420,因为离水库的距离会影响到茶园的开发价值和观光农业价值,并且水库型流域的自然和人文要素都随着距水库的距离呈现出规律性

的变化. 水库距离决定茶园开发的价值和难易程度,是影响茶园开发的关键区位因子和综合因子. 距茶园、道路、村落和河流的距离 4 个适宜性评价因子的卡方检验值均达到 0.2 以上,是影响茶园开发条件的重要适应性因子. 土壤 3 个指标对茶园分布卡方检验值均在 0.2 以下,说明土壤因素不是茶园开发的控制性因素,这主要因为现代茶园开发通过施肥改变土壤的养分条件,养分主要靠外界输入进行补充<sup>[23]</sup>. 筛选卡方检验值 0.2 以上的因子作为茶园影响重要的因子,因此坡度,高程,到水库、河流、主要道路、主要村落和已开发茶园的距離是影响茶园分布的关键因素.

#### 2.4 茶园变化 MLP 神经网络模拟模型

土地利用过程变化受到众多地理要素的影响,神经网络模拟模型基于较强的自学习能力优势,自动基于已有土地利用变化的模式去推理未来土地利用变化的趋势,实现多个变量影响下输出结果的精确化和定量化过程,减少确定权重和影响因子集成的主观性. 由于神经网络模拟人脑的思维过程处理各种关系,尤其是错综复杂的地理空间关系,在国内外都得到广泛的应用<sup>[24-25]</sup>.

为了建立天目湖茶园 MLP 模拟模型,根据前面 Cramer V 卡方检验的评价结果,筛选出 7 个重要影响因素:高程、坡度、河流、水库、主要道路、村落、茶园规模. 在 IDRISI 地理信息系统软件环境中,将 7 个关键影响因素作为神经网络的输入信号,将现状茶园和近期变化作为茶园空间分布的训练样本,设定训练的精度或者误差范围,通过 MLP 神经网络模型多次迭代使模型结果达到最佳,建立天目湖地区茶园开发的 MLP 模拟模型,模型结果将不同区域的林地开发为茶园的可能性量化在 0~1 标准上. 将实际增长的茶园用 MLP 茶园开发模拟模型分散在不同的区域上,然后用实际区位对预测区位进行验证.

神经网络模拟模型是基于现在土地利用变化的模式去推理未来土地利用变化的趋势,在预测未来时期土地利用变化时,模拟结果的可靠性与预测时段和训练时段土地利用的政策是否发生较大变化有关,只有这样才能保证训练参数能够揭示未来的土地利用变化特征. 本研究采用 2008—2010 年作为训练样本,因为这一段时间农业开发中水利设施和道路建设给以补贴等农业开发鼓励政策稳定实施,与现在政策比较接近,同时较短的时段内政策变化不大,训练参数用于模拟 2011 年的变化,并通过 2011 年真实的变化检验模型模拟的效果,模拟精度评价采用公式 2.

$$\text{模拟精度} = \frac{\sum | \text{分区模拟像元总数} - \text{分区实际像元总数} |}{\text{增长像元总数}} \quad (2)$$

模型精度采用分区精度检验的方法代替像元——对应的检验方式,因为茶园开发在流域的不同部位对流域生态及水环境产生的影响有较大差异,如上游地区是水源区,茶园开发对水源涵养功能有很大影响,而河口区对水质有较强的净化作用,开发后对水质影响显著,因此预测茶园分布格局的变化比局部像元变化更重要. 分区采用基于土地利用变化的综合因素分区评估进行的分区结果,量化分析茶园在这些区域上的分布特征. 结果显示,模拟结果与 2011 年实际茶园开发在各个分区的相对分布大小趋势具有高

度的一致性,对于茶园增长的平均模拟精度达到 84.0%,即使模拟差异最大的沙河水库西岸岸坡精度也在 75% 以上。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用时间变化特征

3.1.1 土地利用总体变化特征 茶园开发对林地的占用是研究区的主要土地利用转换类型。采用天目湖流域 2002 年和 2011 年的土地利用类型变化面积进行矩阵统计分析(表 2),发现面积减少的用地类型主要是林地和农田,分别为 21.3 和 11.9 km<sup>2</sup>;面积增多的用地类型主要是茶园、退耕地、裸地和建设用地,分别为 18.3、6.8、3.5 和 2.5 km<sup>2</sup>。转换类型主要是林地向茶园、建设用地及裸地的转换,农田还林(草)和建设用地的转换。茶园增长主要是占用林地类型,平均每年的占用面积为 2.0 km<sup>2</sup>,即每年约 1.6% 的林地转化为茶园。

表 2 天目湖地区 2002 年和 2011 年土地利用变化转换矩阵(km<sup>2</sup>)

Tab.2 The landuse change matrix in 2002 and 2011 in Tianmuhu Reservoir region

		2002 年							
		农田	水体	林地	草地	建设用地	湿地	裸地	茶园
2011 年	农田	55.5	0	0	0	0	0	0.4	0
	水体	0.3	26.3	0.3	0	0	0	0.1	0
	林地	0.9	0	105.7	0	0	0.1	0	0
	草地	0.9	0.1	0.1	2.2	0	0	0	0
	建设用地	1.6	0	0.8	0	8.4	0	0	0.1
	湿地	0	0	0	0	0	4.7	0	0
	裸地	0.9	0	2.6	0	0	0	0.4	0
	退耕地	6.7	0.2	0	0	0	0	0	0
	茶园	0.7	0	17.5	0	0	0	0	8.3

3.1.2 茶园时间变化特征 为了进一步分析茶园逐年的变化速率,对 2000 年以来其开发面积进行统计分析,发现其呈现快速增长的趋势(图 2)。11 年间流域茶园的面积迅速由 6.2 km<sup>2</sup> 增长到 26.5 km<sup>2</sup>,平均每年增长流域面积的 0.75%。2005 年以前,加速增长的趋势尚且不明显,5 年时间茶园面积从 6.2 km<sup>2</sup> 增长到 10.1 km<sup>2</sup>。2005 年以后,当地政府鼓励茶园的开发种植,企业投资规模化开发茶园,不仅使得茶园开发的速度增加,而且茶园的规模也迅速增大,2005 年以前茶园的规模由 2005 年的 4.5 hm<sup>2</sup> 增长到 2008 年的 6.6 hm<sup>2</sup>。尤其是 2008 年以后研究区的茶园开发速度平均达到 4.1 km<sup>2</sup>/a,占流域总面积的 1.67%,将近 2005 年以前的 6 倍,超过 20 世纪末以来太湖流域城镇化的发展速率(0.9%)<sup>[26]</sup>,由此可见茶园长期按此速率增长,天目湖丘陵山区自然林地将丧失殆尽。

#### 3.2 茶园空间分布特征

茶园在研究区的空间分布及其变化上均有显著的差异,这些差异可能受地形条件、区位条件和可达性条件影响。高程和坡度直接影响到茶园种植的开发成本与开发效益,因为高程高、坡度陡的区域不仅水热条件不适宜茶园的生长,而且大型现代化设备难以进入,茶园管理所需的人力、物质资源难以到达。为了验证地形条件对茶园分布的影响,本研究对茶园的地形和坡度进行分析(图 3a、b),发现茶园在两者分布上均比较集中。天目湖地区高程范围为 0~531 m,坡度范围 0~52°。根据统计,0~90 m 高程内茶园分布最多,增长最快,各个时期都集中了研究区 90% 左右的茶园;尤其是 30~60 m 高程,各时期茶园面积都达到研究区总面积的 40%;150 m 以上高程范围内茶园分布不足 2%。在坡度上,茶园坡度一般不超过 25°,80% 的茶园集中在 0~15° 坡度,在整体上随着坡度的增加茶园面积呈现出减少的趋势;但是由于坡度太低、土壤透水性不好,多宜开发为农田,所以就开发密度而言,0~5° 坡度的开发密度低于 5~10° 和 10~15°,分别是 2 个密集区的 1/4 和 1/2。由此可见,高程和坡度是影响茶园分布差异的重要条件。

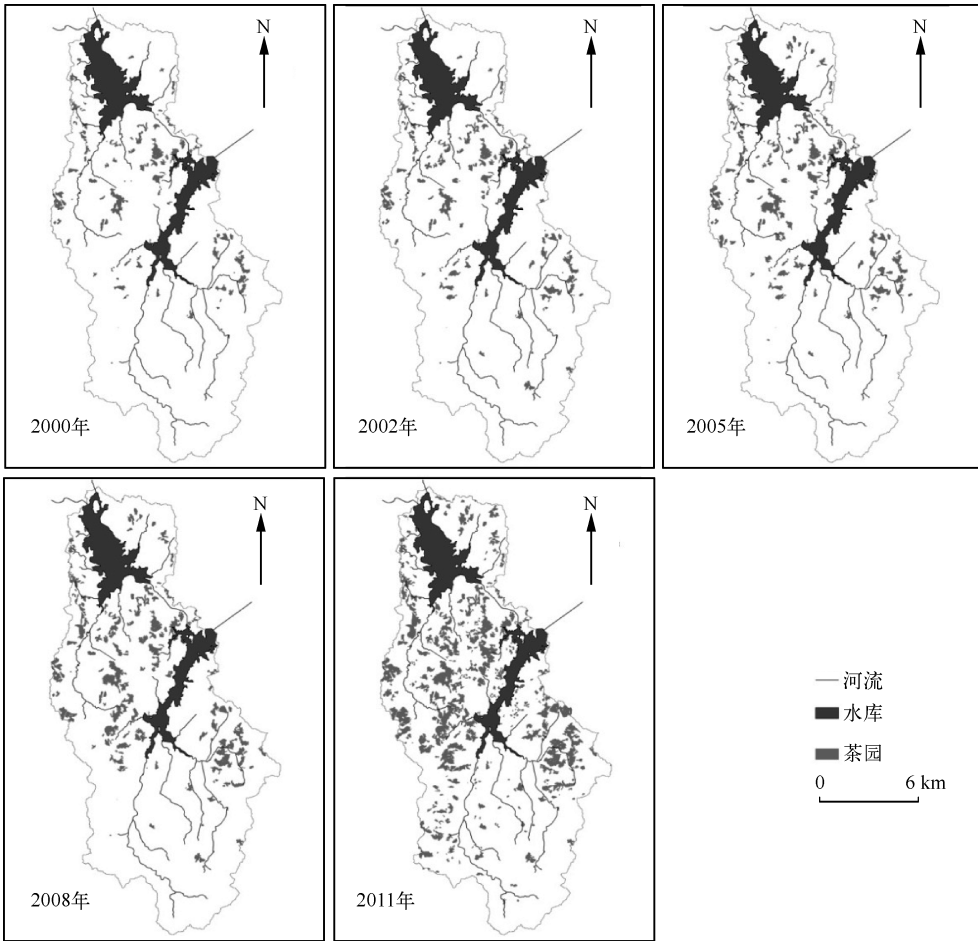


图2 天目湖地区不同时期茶园开发空间分布

Fig.2 The tea plantation space distribution at different times in Tianmuhu Reservoir region

在天目湖地区,沙河水库和大溪水库发挥着重要的供水和旅游的功能,水库附近相对上游地区交通条件较好,居民点分布多,而且茶园开发兼具旅游观光价值.对流域内距水库不同距离的茶园分布进行分析(图3c),发现各个时期茶园整体上都具有向水库趋近的趋势.1~2 km 距离处,条件较好的山坡分布比较多,茶园开发面积与开发密度均最高,2011年有40.0%的茶园分布在该分区内;其次是2~3 km 水库距离分区,茶园面积比例为21.5%.水库周边应水源保护需求和水位变化淹没危机,水库1 km 距离范围内分布相对少些;水库3 km 距离以外近年随着流域上交通条件的改善和茶园开发技术的进步,茶园开发向流域上游扩张.

因此,综合地形条件、区位条件和可达性条件,本研究运用DEM数据通过ARCGIS的插件Arc Hydro的水文流域划分,将整个流域按照与两大水库的上下游关系,划分为11个流域分区:区域1:大溪水库西岸临湖岸坡;区域2:大溪水库东岸临湖岸坡;区域3:大溪水库河口区;区域4:大溪水库中下游山区;区域5:大溪水库上游水源涵养区;区域6:沙河水库西岸临湖岸坡;区域7:沙河水库东岸临湖岸坡;区域8:沙河水库河口区;区域9:沙河水库中下游西部山区;区域10:沙河水库中下游东部山区;区域11:沙河水库上游水源涵养区(图4).对茶园在11个分区上的分布进行统计发现,大溪水库中下游山区、沙河水库西岸临湖岸坡、沙河水库中下游东部山区3个分区内集中了流域70%左右的茶园面积.这3个区域地形较缓、周围大型居民区集中,道路网密集,是流域上社会经济基础设施比较完善的区域.流域的上游地区为区域的水源涵养区,植被覆盖度高,茶园开发的成本高,并且区域的社会经济发展落后,道路分布稀少,茶园开发面积比较少,茶园分布比例在10%以下.2008年以后沙河水库中下游西部山区的面积增长加快,迅速成为天目湖流域茶园

开发的重点区域,因为大规模的企业经营占据水库周边优势地理位置,在经济利益的驱使下,许多个体承包或者小型的企业将开发转移到沙河水库中下游西部山区广阔的丘陵山地地区。

### 3.3 茶园分布变化趋势模拟

天目湖同时承载着供水、旅游和农业发展的重任,在未来可能出现开发与水源生态保护的冲突,如果能够了解未来土地利用的可能变化,就可能提前制定相关限制政策避免不利的土地利用变化发生。因此,预测茶园未来的发展趋势具有重要的意义。考虑到未来土地利用政策有很大的不确定性,本研究依据不同情景茶园增加量,选择3种情景模拟2020年茶园在空间区位上的分布(图5):情景1延续现有变化:即茶园增长速率 $4.1 \text{ km}^2/\text{a}$ ,到2020年天目湖地区的茶园总面积将达到 $63.4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的 $1/4$ ;情景2 2000年左右未出台鼓励政策时期的变化:政府采用茶园开发控制政策,茶园的增长速率减缓到 $0.7 \text{ km}^2/\text{a}$ ,到2020年流域上的茶园总面积约为 $32.8 \text{ km}^2$ ;情景3两者折中开发:茶园的增长为情景1与情景2的平均值,即2020年流域茶园总面积为 $48.6 \text{ km}^2$ 。

水库周边地区和上游水源涵养区茶园的分布情况对区域整体生态功能的维护和水库水质水量的保护具有重要的意义,因此重点分析3种情景下这些区域茶园开发对区域林地占用的面积(表3)。沙河水库和大溪水库水源涵养区在3种情景中林地覆盖度的降低比例分别为21%、4%、10%和

19%、2%、7%;可见情景1模式下水源涵养区的林地覆盖度下降比较快,可能会威胁到整个流域的水源供给问题;情景2林地覆盖率降低比较缓慢,仅为情景1过程中的 $1/5$ 和 $1/8.5$ ,但是这种模式林地覆盖度仍然呈现减少的趋势。两水库临湖地带茶园在3种情景中增加 $0.5 \sim 2.0$ 倍,情景1临湖岸坡地带茶园的增长速率达到情景2的4倍和2倍,茶园快速增长可能会导致营养物质入湖量增多,影响水库的水质。情景1模式茶园增长快,破坏区域生态多样性,可能会威胁到区域的水量供给和水质安全,茶园开发应当受到控制。情景2和情景3模式下,虽然茶园的开发速率较情景1有所减慢,短期内的破坏不及情景1,但是从长期来看,不能改变茶园开发所带来的水源破坏趋势。在未来茶园开发的控制管理过程中,制定政策重新分配茶园发展的区域分布,对具有重要生态功能价值的区域重点保护十分必要。

## 4 结论

茶园是天目湖流域丘陵山区的主要开发类型,面积占整个流域的10.7%(2011年数据)。2000—2011年流域茶园开发总面积由 $6.2 \text{ km}^2$ 增长至 $26.5 \text{ km}^2$ ;11年茶园的年平均增长速率为 $1.8 \text{ km}^2/\text{a}$ ,约为流域总面积的

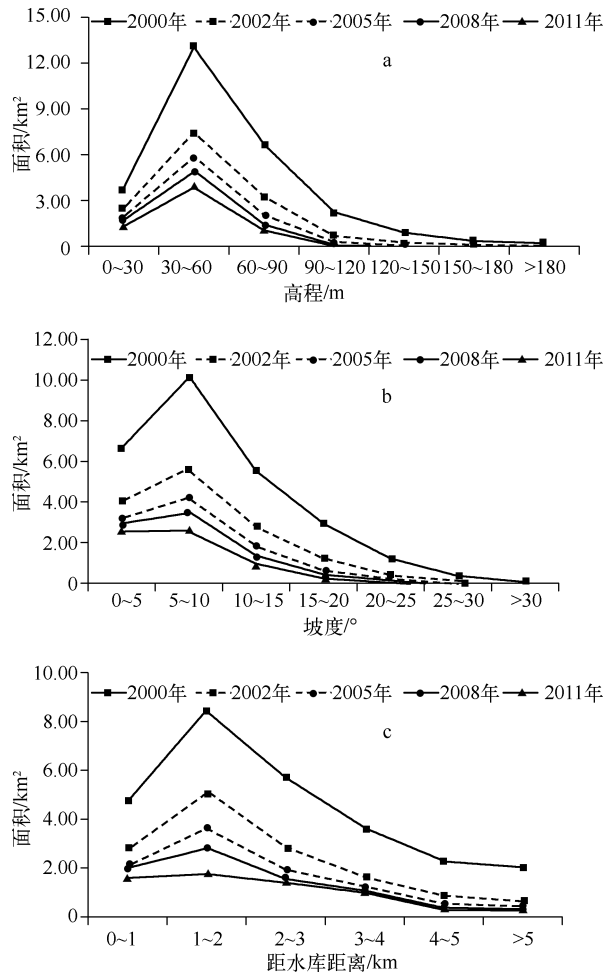


图3 2000年以来天目湖流域茶园不同高程(a)、坡度(b)和水库距离(c)的分布面积变化

Fig. 3 The area distribution of tea plantations in different elevation (a), slopes (b) and the distances from reservoirs (c) in Tianmu Lake Reservoir area since 2000

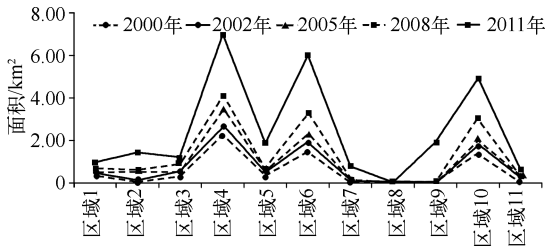
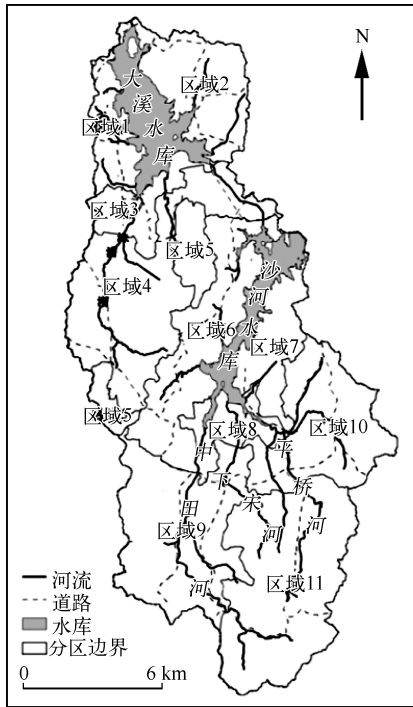


图4 天目湖水文流域分区和2000年以来茶园在不同分区内的分布变化

Fig.4 The hydrological basin areas and tea plantation area distribution of them in Tianmuhu Reservoir region since 2000

0.75%。2000年以来茶园开发速度呈现出快速增长的趋势,尤其是2008年以后在政府鼓励和市场的双重刺激下,茶园开发速率增长为2008年以前的3.7倍,每年流域面积的1.67%被开发为茶园。

茶园在流域上的空间分布存在很大的差异性,而且由于茶园开发规模化效益的影响,茶园集中的区域增长相对较快。在天目湖地区的11个水文分区中,大溪水水库西部临湖岸坡、沙河水库西岸临湖岸坡和沙河水库中下游东部山区3个区域集中了整个流域70%的茶园。这些差异性与茶园开发的地形条件、区位条件和开发条件有关。高程高、坡度大会增加开发的成本、降低茶园的效益,因此90%以上的茶园分布在90 m高程范围内,坡度一般不超过25°。由于区域社会经济发展活动围绕水库进行,茶园分布在整体上有靠近水库分布的趋势。

综合茶园开发的自然条件和区位、规模等开发条件,筛选出影响茶园分布的7个关键因素:高程、坡度、水库、河流、道路、村落和茶园规模,建立天目湖地区的茶园开发MLP神经网络模拟模型,区位预测精度达到84%。这种模型能够反映过去研究区茶园开发的模式,具有预测未来茶园开发的空间分布的能力,可以用来模拟天目湖地区今后茶园开发的分布状况。

按照现有茶园开发变化、2000年左右政府未出台鼓励政策时期的茶园变化和折中变化这3种发展情景来模拟2020年茶园开发。按照现有的开发模式,即4.1 km<sup>2</sup>/a,2020年天目湖流域茶园面积将达到63.4 km<sup>2</sup>,现有林地的1/3将被开发为茶园,流域面积的1/4以上将分布为茶园类型;水源涵养区林地的覆盖度都将降低20%左右,水库临湖岸坡茶园面积增长为现在的3倍和2倍;未出台政策以前的发展模式在很大程度上能够减慢水源涵养林地的

占用速率,但是无法改变占用的趋势,因此未来的茶园开发管理政策必须从面积的限制和格局分布的调控两方面采取措施进行控制管理。

表3 不同预测情景下2020年林地在主要功能分区内的分布

Tab.3 The distribution of forest in the main watershed function areas under different prediction scenarios in 2020

功能分区	现有林地		情景1		情景2		情景3	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
全流域	106.40	43	69.50	28	86.52	35	103.53	42
大溪水水库西岸临湖岸坡	2.83	34	0.87	10	2.32	28	1.80	21
大溪水水库东岸临湖岸坡	4.66	24	2.52	13	4.19	22	3.53	18
大溪水水库上游水源涵养区	5.55	62	3.83	43	5.38	60	4.93	55
沙河水库西岸临湖岸坡	8.15	31	5.15	19	7.60	29	6.76	25
沙河水库东岸临湖岸坡	6.57	56	2.88	25	5.11	44	4.19	36
沙河水库上游水源涵养区	33.03	82	24.70	61	31.50	78	28.86	72



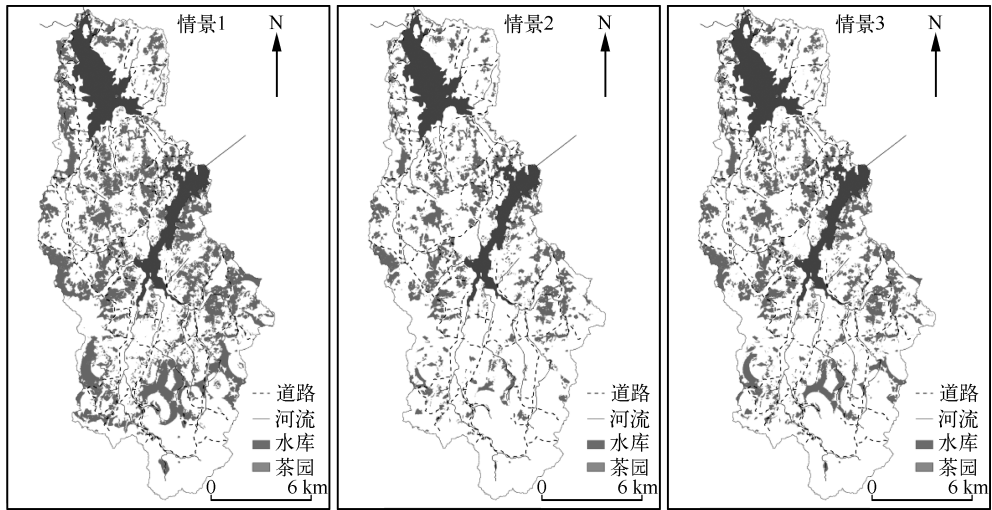


图5 基于茶园开发 MLP 模拟模型的 2020 年不同情景下的茶园分布预测

Fig. 5 Tea plantation prediction model based on MLP neural network in 2020

## 5 参考文献

- [ 1 ] 刘纪远,邓祥征. LUCG 时空过程研究的方法进展. 科学通报,2009,54(21):3251-3258.
- [ 2 ] Hao HM ,Ren ZY. Land use/land cover change (LUCG) and eco-environment response to LUCG in farming-pastoral zone, China. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(1): 91-97.
- [ 3 ] Xu HZ, Qu FT, Guo ZX. Dynamic changes and optimal allocation of arable land conversion in transition of Jiangsu Province. *China Population, Resources and Environment*, 2007,17(5):54-58.
- [ 4 ] Louisa JM, Jansen MBMF. Analysis of landcover/use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254: 308-326.
- [ 5 ] Lopez-Carr D, Davis J, Jankows *et al.* Space versus place in complex human-natural systems: Spatial and multi-level models of tropical land use and cover change (LUCG) in Guatemala. *Ecological Modelling*, 2012, 229:64-75.
- [ 6 ] Evans TP, Manire A, de Castro F. A dynamic model of household decision-making and parcel level landcover change in the eastern Amazon. *Ecological Modelling*,2001,143: 95-113.
- [ 7 ] Miriam SW, Taylor VS. Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography*,2010, 30: 329-342.
- [ 8 ] 陈志强. 区域多尺度 LUCG 及空间数据库研究[学位论文]. 福州:福建师范大学,2006.
- [ 9 ] 何春阳,史培军,陈晋等. 北京地区土地利用/覆盖变化研究. 地理研究,2001,20(6):679-688.
- [ 10 ] 刘纪远,张增祥,徐新良等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. 地理学报,2009,64(12): 1411-1420.
- [ 11 ] 摆万奇,赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析. 资源科学,2001,23(3):39-41.
- [ 12 ] 彭建,蔡运龙. LUCG 框架下喀斯特地区土地利用/覆被变化研究现状与展望. 中国土地科学,2006,20(5): 48-53.
- [ 13 ] Rao KS,Rekha P. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical micro watershed in the mid elevation zone of central Himalaya, India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2001, 86:113-123.
- [ 14 ] 张银辉,罗毅,刘纪远等. 灌区土地利用变化驱动因素分析——以内蒙古河套灌区为例. 资源科学,2006,28(1): 81-86.
- [ 15 ] 吴宏安,蒋建军,周杰等. 西安城市扩张及其驱动力分析. 地理学报,2005,60(1):143-150.
- [ 16 ] 李明,李广杰,张文等. 基于卡方检验法对长白山龙门峰裂隙岩体统计均值区划分. 吉林大学学报:地球科学

- 版, 2012, 42(2): 449-453.
- [17] 徐广才, 康慕谊, 李亚飞. 基于 MLP-ANN 与 Markov Chain 的土地利用变化预测方法——以锡林郭勒盟为例. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2386-2392.
- [18] Eastman JR. IDRSI Taiga Tutorial. Massachusetts: Clark Labs, 2009: 270.
- [16] 吴 洵. 茶园土壤管理与施肥技术: 第 2 版. 北京: 金盾出版社, 2009.
- [20] Li HM, Ma YX, Liu WJ *et al.* Soil changes induced by rubber and tea plantation establishment: Comparison with tropical rain forest soil in xishuangbanna, SW China. *Environmental Management*, 2012, 50: 837-848.
- [21] Liu ZA, Yang JP, Yang ZC. Effects of rainfall and fertilizer types on nitrogen and phosphorus concentrations in surface runoff from subtropical tea fields in Zhejiang, China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93: 297-307.
- [22] 吴承龙, 程 亮, 王成庭等. 基于 GIS 的皖南山区茶叶种植适宜性评价. 农业网络信息, 2012, 2: 27-32.
- [23] 韩 莹, 李恒鹏, 聂小飞等. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮磷收支平衡特征. 湖泊科学, 2012, 24(6): 829-837.
- [24] Li Y, Li CK, Tao JJ *et al.* Study on spatial distribution of soil heavy metals in Huizhou city based on BP-ANN modeling and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1953-1960.
- [25] Plumb AP, Rowe RC, York P *et al.* Optimisation of the predictive ability of artificial neural network(ANN) models: A comparison of three ANN programs and four classes of training algorithm. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2005, 25: 395-405.
- [26] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响. 资源科学, 2011, 33(10): 1940-1947.