

浙江省丽水市莲都区水源涵养功能动态变化及发展趋势

俞佳骏¹, 余树全¹, 梁立成¹, 张超¹, 周文春²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省丽水市莲都区林业局, 浙江 丽水 323000)

摘要: 水源涵养功能是生态系统服务功能中重要的一项。了解区域水源涵养功能的现状和未来变化, 对水源涵养保护与利用有重要意义。以浙江省丽水市莲都区为研究范围, 利用 InVEST 模型对研究区 1994, 2001, 2008 和 2015 年的水源涵养功能进行了计算评估及重要性评价, 利用 CA-Markov 模型对研究区 2030 年的土地覆被类型进行了预测, 并进行水源涵养功能评估。结果表明: 莲都区 1994, 2001, 2008 和 2015 年的平均水源涵养量分别为 69.98, 98.40, 82.36 和 114.01 mm, 水源涵养总量分别为 1.11×10^8 , 1.56×10^8 , 1.23×10^8 和 1.83×10^8 m³, 水源涵养功能 21 a 间提高了 62.92%。研究区南部地区和北部部分地区水源涵养功能较好, 中部地区的水源涵养功能低于其他地区。影响研究区水源涵养功能最主要的两类因素是下垫面特征和气候因素, 其中土壤饱和导水率为影响最大的因素, 标准化系数达到了 0.644。2030 年模拟结果显示, 莲都区水源涵养功能与 2015 年差异不大, 平均水源涵养量和总量分别为 112.90 mm 和 1.81×10^8 m³。通过水源涵养功能评价模拟, 发现研究区的西北地区水源涵养潜力较大。图 4 表 5 参 28

关键词: 生态学; 水源涵养功能; InVEST; CA-Markov; 莲都区

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)02-0189-10

Dynamic changes and development of water retention in Liandu District

YU Jiajun¹, YU Shuquan¹, LIANG Licheng¹, ZHANG Chao¹, ZHOU Wenchun²

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Forest Enterprise of Liandu District, Lishui 323000, Zhejiang, China)

Abstract: Water retention, a most important ecosystem service that is key to water source protection planning, reflects the ability of an ecosystem to keep the water, as well as showing water available for human consumption. To better understand the characteristics of water retention and to better protect the water environment of Liandu District in southwest Zhejiang Province, this study evaluated the quantity and spatial characteristics of its water retention. The assessment was carried out using the InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) model. Then a simulation of water retention for Liandu in 2030 was conducted by the CA-Markov Model. The main results showed that from 1994 to 2015, the city area increased by 6.11×10^4 hm², the total area of forest increased 1.35×10^4 hm², and by contrast, the rocky area decreased 1.91×10^5 hm². For the study area the average water retention in 1994 was 69.98 mm, in 2001 was 98.40 mm, in 2008 was 82.36 mm, and in 2015 was 114.01 mm; total water retention in 1994 was 1.11×10^8 m³, in 2001 was 1.56×10^8 m³, in 2008 was 1.23×10^8 m³, and in 2015 was 1.83×10^8 m³. Overall, water retention increased 62.92%. Underlying surface and climatic features were the two greatest factors affecting water retention with soil hydraulic conductivity, having a standardized coefficient of 0.644, being the most important. Also, a large difference in spatial distribution for different time periods was found. In general, the southern and northern parts of the study area had

收稿日期: 2017-02-12; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 浙江省科学技术重点资助项目(2017C02028)

作者简介: 俞佳骏, 从事景观生态学和森林生态学研究。E-mail: 392743778@qq.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林生态、植物生理生态和景观生态研究。E-mail: yushq@zafu.edu.cn

better water retention with the central parts not as good. The simulation showed that the average water retention of the study area was 112.90 mm, and total water retention was $1.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ with the northwest region having a greater water retention potential. Thus, combining the InVEST Model and CA-Markov Model provided a favorable reference for effective management of water retention. [Ch, 4 fig. 5 tab. 28 ref.]

Key words: ecology; water retention; InVEST model; CA-Markov; Liandu District

人类从生态系统中直接或间接地获得的益处被定义为生态系统服务功能^[1]。生态系统服务功能与人类的生存息息相关,为人和自然的连接提供了一种可以进行价值评估的方法,并为保护和恢复生态系统提供了论据基础^[2]。20世纪中期以来,全球气候变暖,气温的上升加速了全球水循环变化,也加剧了极端水文事件的发生,导致了全球水资源的重新分配^[3]。水源涵养服务功能是生态系统服务中的极为重要的组成部分,开展水源涵养功能现状和未来变化的研究,对理解不同区域尺度在全球变暖趋势下的响应具有重要意义。目前,测量水源涵养能力的方法主要有土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、林冠截流剩余量法、水量平衡法、降水储存量法、年径流量法、地下径流增长法和多因子回归法^[4]。InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型由斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会和其他相关机构共同开发^[5],其水源涵养功能模块主要是基于水量平衡法进行测算。InVEST模型在国外已有诸多成功应用^[6-10],国内利用InVEST模型进行的水源涵养研究主要集中在空间格局评价方面^[11-16],对历年的时空序列变化分析较少,结合CA-Markov模型^[17]进行未来的预测尚未见到报道。浙江省丽水市莲都区是浙江八大水系中瓯江水系、灵江水系和飞云江水系的发源地。本研究利用InVEST水源涵养功能模块和CA-Markov土地利用预测模型相结合的方法,分析莲都区水源涵养功能的时空变化特征,可为浙江省提出的“五水共治”重大决策部署提供科学依据,为区域水源涵养功能规划提供理论指导。

1 研究区概况

莲都区地处浙江省丽水市瓯江上中游,位于 $28^{\circ}06' \sim 28^{\circ}44' \text{N}$, $119^{\circ}32' \sim 120^{\circ}08' \text{E}$,总面积为 $1\,502 \text{ km}^2$ 。地处括苍山、洞宫山、仙霞岭3条山脉之间。境内地形可分为河谷平原、丘陵、山地3种,其中,低丘和高丘占全区总面积的57.0%,低山、中山面积占全区总面积的30.2%,平均海拔为381 m。气候属中亚热带季风气候类型,雨水充沛,温暖湿润,四季分明,具有明显的山地立体气候特征^[18]。

2 研究方法

2.1 水源涵养评价方法

利用InVEST模型对水源涵养功能进行评价。该模型主要根据水量平衡原理,通过降水、植物蒸腾、地表蒸发、根系深度和土壤深度等参数计算产水量。在产水量的基础上,考虑土壤厚度、渗透性、地形等因素的影响,利用地形指数、流速系数和土壤饱和导水率对产水量进行修正。根据式(1)计算获得水源涵养量:

$$R = \min\left(1, \frac{249}{V_e}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times I_T}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K}{300}\right) \times Y \quad (1)$$

式(1)中: R 为水源涵养量(mm); V_e 为流速系数; K 为土壤饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),根据式(2)计算; I_T 为地形指数,无量纲,根据式(3)计算; Y 为产水量,根据式(4)计算。

$$K = 60.96 \times 10^{(-0.6 + 0.012 \text{GS} - 0.006 \text{4C})} \quad (2)$$

土壤饱和导水率基于Cosby土壤饱和导水率传递函数计算。式(2)中, S 和 C 分别代表砂粒和黏粒的含量(%)。

$$I_T = \lg\left(\frac{D_A}{S_D P_S}\right) \quad (3)$$

式(3)中: D_A 为集水区栅格数量; S_D 为土壤深度; P_S 为百分比坡度。

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{A_{jx}^{\text{ET}}}{P_x}\right) P_x \quad (4)$$

式(4)中: Y_{jx} 为年产水量; P_x 为年均降水量; A_{jx}^{ET} 为土地利用类型 j 栅格上单元 x 的年均蒸散量,由式

(5) 计算。

$$\frac{A_{xy}^{ET}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xy}}{1 + \omega_x R_{xy} + 1/R_{xy}} \quad (5)$$

式(5)中： R_{xy} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的干燥指数，无量纲，为潜在蒸发量与降水量的比值，根据式(6)计算； ω_x 为植物年需水量和降水量的比值，是描述自然气候和土壤性质的参数，根据式(8)计算。

$$R_{xy} = \frac{k \times E_0^T}{P_x} \quad (6)$$

式(6)中： k 为作物系数，是作物蒸散量 E^T 与潜在蒸散量 E_0^T 的比值； E_0^T 是指假设平坦地面被特定矮秆绿色植物全部遮蔽，同时土壤保持充分湿润情况下的蒸散量，采用式(7)计算。

$$E_0^T = 0.0013 \times 0.408 \times R_A \times (T_{avg} + 17) \times (T_D - 0.0123P)^{0.76} \quad (7)$$

式(7)中： E_0^T 为潜在蒸发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)； R_A 为太阳顶层辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)； T_{avg} 为日最高气温均值和日最低气温均值的平均值($^{\circ}\text{C}$)； T_D 为日最高气温均值和日最低气温均值的差值($^{\circ}\text{C}$)； P 为月均值降水量。

$$\omega_x = Z \frac{A_x^{WC}}{P_x} \quad (8)$$

式(8)中： Z 为 Zhang 系数，表征降水季节性特征的一个常数，其值为 1~10，降水主要集中在冬季时，其值接近于 10，降水主要集中在与夏季或季节分布均匀时，其值接近于 1。 A_x^{WC} 为植被有效可利用水。

2.2 CA-Markov 模型

元胞自动机(cellular automata, CA)是由 Von NEUMANN 等在 20 世纪 40 年代最早提出的一种时间、空间和状态都离散的网格动力学模型。马尔可夫链(Markov)是预测事件发生概率的一种数学方法，是基于随机理论形成的一种具备“无后效性”的特殊随机运动过程，即 $t+1$ 时刻的状态只与 t 时刻的状态有关^[19]。CA-Markov 模型是综合了 Markov 链对长时间序列的预测和 CA 元胞自动机基于空间关系和规则动力学模拟的优点，能更加准确地从时间和空间上模拟土地利用类型变化的情况。

$$S_{t+1} = P_{ij} S_t; \quad (9)$$

$$S'_{t+1} = (U_d, S'_t, N_t, f) \quad (10)$$

式(9)中： S_t, S_{t+1} 为 $t, t+1$ 时刻土地利用系统状态； P_{ij} 为状态转移矩阵。式(10)中， S'_t, S'_{t+1} 为 $t, t+1$ 时刻元胞状态； U_d 为 d 维的元胞空间及网格单元； N_t 为 t 时刻邻居的状态组合； f 为转换规则。

2.3 数据来源及参数处理

根据模型所需参数，对各参数进行获取及本地化处理。以 1994 年 5 月 12 日、2001 年 4 月 13 日 Landsat 5 遥感影像、2008 年 7 月 5 日 Landsat 5 遥感影像以及 2015 年 10 月 13 日 Landsat 8 OLI 影像为数据源，参考“GLC2000 土地覆被分类系统”将土地覆被类型^[20]主要分为裸地、农田、城镇、水体、针叶林、灌丛、阔叶林、竹林和针阔混交林等 9 类，采用随机森林法进行土地覆被类型分类。降水等气候数据根据莲都区及周边地区气象站记录的各年份数据进行插值获得，2030 年气候数据来自于国家气候中心参与政府间气候变化专门委员会(IPCC)时根据北京气候中心模型模拟所得^[21-22]；土壤深度参考浙江省森林资源二类清查数据和 1:50 万浙江省土壤数据；根系深度及流速系数参数根据研究区前期外业调查和周边地区已有研究，进行本地化处理获得，尽量保证参数符合实际情况；土壤饱和水率^[23]参考 1:50 万浙江省土壤数据，利用 COSBY 等^[24]的土壤传递函数计算获得；植物可利用水根据外业调查所得田间持水量数据，参考周文佐^[25]的研究结果进行处理获得；地形数据来源于日本地球遥感数据分析中心提供的 30 m 分辨率全球数字高程模型数据。

本研究利用 InVEST 模型计算水源涵养功能时均以 30 m × 30 m 分辨率的栅格图为参数来源，同样也是以该分辨率栅格作为最小单位对结果进行输出计算。输出结果为水源涵养深度(mm)。通过单位换算汇总得出研究区水源涵养总量(m^3)。以乡镇矢量边界对研究区各地区水源涵养量进行统计，从而分析研究区水源涵养功能的数量及空间变化特征。

对遥感影像进行解译后，由于地物光谱特征存在“异物同谱”和“同物异谱”现象，因此，2015 年土地覆被类型是利用高精度影像和野外实地调查数据对研究区土地覆被类型分类进行精度验证。对于 1994, 2001 和 2008 年土地覆被类型分类无法进行野外实地调查验证的问题，根据土地覆被类型具有一定规律性的特点，结合相关年份的统计年鉴、森林资源二类小班调查数据和当时的土地利用现状图等辅

助方法加以验证。验证结果显示, 研究区 1994, 2001, 2008 和 2015 年土地覆被类型遥感解译精度分别为 76.3%, 78.6%, 81.4% 和 84.3%, 达到了研究所需要求。

3 结果分析

3.1 土地覆被数量与空间变化

从表 1 可以看出: 2015 年研究区针叶林的面积最大, 达 $6.08 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其次是针阔混交林和阔叶林, 分别为 $2.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $2.16 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 裸地、水体和灌木林的面积较小。1994–2015 年, 城镇、阔叶林、竹林和针阔混交林面积均有不同程度增加, 其中, 针阔混交林增幅最大, 其次分别是城镇、阔叶林和竹林。裸地、农田、水体和针叶林面积均有不同程度的下降, 其中, 针叶林和裸地下降幅度最大, 其次分别是农田和水面面积。

表 1 不同年份不同土地覆被类型的面积和比例

Table 1 Area and proportion of land cover in different years

土地覆被类型	1994		2001		2008		2015	
	比例/%	面积/ $(\times 10^4 \text{ hm}^2)$						
裸地	14.43	2.17	7.46	1.12	2.46	0.37	1.69	0.25
农田	7.66	1.15	7.84	1.18	7.41	1.11	7.56	1.14
城镇	3.22	0.48	4.31	0.65	5.52	0.83	7.29	1.09
水体	1.22	0.18	1.42	0.21	1.26	0.19	1.01	0.15
针叶林	54.29	8.15	49.66	7.46	49.03	7.37	40.46	6.08
灌木林	0.79	0.12	3.21	0.48	1.51	0.23	1.52	0.23
阔叶林	7.38	1.11	7.94	1.19	9.65	1.45	14.41	2.16
竹林	3.46	0.52	6.02	0.90	9.59	1.44	9.08	1.36
针阔混交林	7.54	1.13	12.13	1.82	13.58	2.04	16.99	2.55

从图 1 研究区土地覆被空间分布状况可以看出: 1994–2001 年, 研究区中北部地区裸地面积显著减少, 被以针叶林为主的林地所替代; 竹林、阔叶林和针阔混交林面积增长明显, 主要集中在研究区南部, 峰源乡和莲都林场等地。2001–2008 年, 裸地面积持续减少, 竹林、阔叶林和针阔混交林面积持续增加, 在北部和东部部分地区增长明显; 同时在此期间, 城镇面积增长迅速, 主要在万象街道和白云街道原有城镇基础上呈现辐射型扩张, 并在南明山街道地区发展形成新城。2008–2015 年, 城镇面积持续在研究区中部南明山街道等地快速扩张。同时, 研究区北部和南部地区针叶林面积下降, 阔叶林和针阔混交林面积提高。1994–2015 年, 莲都区北部地区裸地被以针叶林为主的林地替代, 南部地区针叶林逐渐被竹林、阔叶林和针阔混交林所替代, 土地覆被类型空间分布格局变化较大。此外, 21 a 间莲都区中部城镇扩张明显, 人为活动增加, 对生态环境干扰加剧。

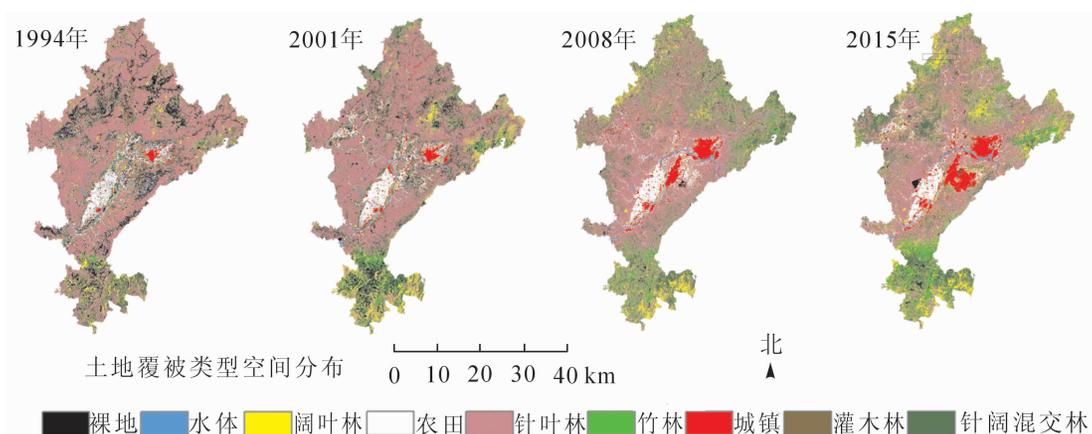


图 1 研究区 1994–2015 年土地覆被类型图

Figure 1 Spatial characteristic of land cover from 1994 to 2015

3.2 水源涵养能力评价

3.2.1 InVEST 模型水源涵养验证 通过查询黄渡、小白岩、上显滩 3 个水文站和五里亭水库的水文记录，获得 1994，2001，2008 和 2015 年研究区的径流深度数据。根据气象数据查询可知：研究区 1994，2001，2008 和 2015 年降水量分别为 1 453.0，1 460.0，1 147.0 和 1 674.0 mm。根据相关研究^[26]可知：蒸散量约占实际降水量的 30%。通过研究区降水量、蒸散量和径流深度可以计算水源涵养深度(V)，公式为 $V=P-E-C$ 。其中： P 为降水量， E 为蒸散量， C 为径流深度。将相关参数代入计算，得出研究区各年份各水文记录点的水源涵养深度值，并将实测结果与 InVEST 模型所得估算结果进行检验，结果如图 2 所示。由图 2 可知：估算值对实测值的回归方程为 $y=0.9x+36.17$ ， R^2 为 0.83，表明方程拟合程度较高，InVEST 模型能够较为真实地反映研究区水源涵养功能。

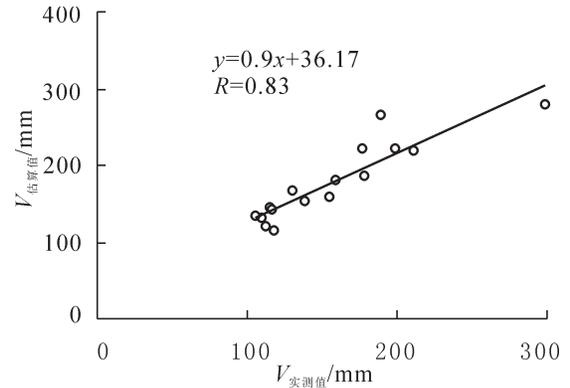


图 2 InVEST 模型精度检验

Figure 2 Accuracy test of InVEST model

3.2.2 水源涵养量时间变化 1994–2015 年，研究区水源涵养功能提高明显。从表 2 可以看出：1994 年研究区水源涵养总量为 $1.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度为 69.98 mm；2001 年研究区水源涵养总量为 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度为 98.40 mm；2008 年研究区水源涵养总量达 $1.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度为 82.36 mm；2015 年研究区水源涵养总量达 $1.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度为 114.01 mm。21 a 间研究区水源涵养功能提高了 62.92%。研究区水源涵养功能提高并非匀速，不同时期变化情况有所不同。1994–2001 年水源涵养总量提高了 $0.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度提高了 28.42 mm，年均水源涵养功能增长 5.10%，2001–2008 年水源涵养总量减少了 $0.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度降低了 16.04 mm，年均水源涵养功能减少 2.33%；2008–2015 年，水源涵养总量增长了 $0.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养深度提高了 31.65 mm，年平均增长率为 5.49%。但从研究区各年度水源涵养深度占降水量比例来看，1994 年为 4.82%，2001 年为 6.47%，2008 年为 7.18%，一直表现增长趋势，但 2015 年由于降水量过高，水源涵养深度占降水量

表 2 1994–2015 年研究区水源涵养功能情况

Table 2 Water retention of study area from 1994 to 2015

街道	1994		2001		2008		2015	
	水源涵养深度/mm	水源涵养总量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$						
万象街道	27.06	0.35	31.07	0.40	17.55	20.54	28.16	0.37
岩泉街道	81.98	7.88	119.69	11.52	90.48	783.53	137.25	13.21
市白云山林场	87.91	2.61	135.71	4.02	102.59	273.64	151.68	4.50
白云街道	28.50	0.06	39.18	0.09	29.03	5.92	40.93	0.09
雅溪镇	80.96	14.32	121.65	21.55	94.81	1 511.84	141.78	25.12
紫金街道	65.49	4.35	89.01	5.91	68.58	409.99	100.69	6.69
联城街道	54.37	6.73	79.01	9.77	62.29	693.42	93.47	11.56
老竹畲族镇	64.81	6.01	95.63	8.88	78.27	654.37	114.29	10.62
莲都林场	98.07	12.75	126.79	16.51	109.28	1 281.08	155.66	20.28
仙渡乡	53.58	3.75	74.31	5.21	60.44	381.44	89.90	6.30
丽新畲族乡	46.82	4.16	65.14	5.80	52.93	424.14	76.93	6.85
碧湖镇	53.34	12.03	79.79	18.01	58.9	1 196.41	90.76	20.49
峰源乡	146.35	13.70	194.49	18.26	160.49	1355.9	229.05	21.50
大港头镇	55.26	5.56	66.57	6.71	54.77	496.61	82.68	8.33
黄村乡	130.72	15.07	192.57	22.27	147.47	1 534.74	223.45	25.84
太平乡	71.72	8.38	106.07	12.40	84.39	887.99	127.27	14.88
南明山街道	42.74	5.17	56.08	6.78	39.2	426.67	54.21	6.56

6.81%，稍有下降。从表2可以看出：21 a间研究区各乡镇水源涵养功能提高程度差异明显，其中，水源涵养总量增长明显的乡镇为雅溪镇和黄村乡，1994–2015年分别增长了 $9.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $9.68 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，分别提高了75.44%和71.42%。水源涵养总量增长较少的是万象街道，增长 $0.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，仅提高了5.71%。水源涵养深度提高最为明显的依然是雅溪镇和黄村乡，分别提高了82.70 mm和92.73 mm，提高比例分别为75.12%和70.94%。万象街道的水源涵养深度提高最少，仅1.10 mm，提升比例仅为4.07%。从表3可以看出：研究区水源涵养功能变化呈现先增后减再增，总体提高的趋势。但各乡镇地区水源涵养功能前中后期变化特征并不一致，其中万象街道、莲都林场和大港头镇后期年平均增长速率高于前期；白云街道、紫金街道、仙渡乡、丽新畲族乡、峰源乡和南明山街道前期年平均增长速率相近；其余各乡镇前期年平均增长速率高于后期。

表3 1994–2015年各时期研究区水源涵养功能变化特征

Table 3 Characteristics of water retention function in different periods from 1994 to 2015

乡镇名称	年平均增长率/%				乡镇名称	年平均增长率/%			
	1994–2001	2001–2008	2008–2015	1994–2015		1994–2001	2001–2008	2008–2015	1994–2015
万象街道	2.12	-6.22	5.38	0.58	仙渡乡	5.53	-2.67	4.68	9.69
岩泉街道	6.57	-3.49	4.87	9.63	丽新畲族乡	5.59	-2.68	4.46	9.19
市白云山林场	7.77	-3.49	4.62	10.36	碧湖镇	7.08	-3.74	5.02	10.02
白云街道	5.36	-3.70	4.15	6.23	峰源乡	4.70	-2.50	4.28	8.07
雅溪镇	7.18	-3.15	4.73	10.73	大港头镇	2.92	-2.53	4.82	7.09
紫金街道	5.13	-3.28	4.56	7.68	黄村乡	6.76	-3.35	4.86	10.13
联城街道	6.47	-3.02	4.77	10.27	太平乡	6.84	-2.92	4.81	11.06
老竹畲族镇	6.79	-2.59	4.50	10.91	南明山街道	4.46	-4.30	3.96	3.83
莲都林场	4.18	-1.97	4.26	8.39					

3.2.3 水源涵养功能空间格局变化 从图3可以看出：研究区1994，2001，2008，2015年的水源涵养功能空间差异明显。1994年水源涵养深度为69.98 mm，仅东北部黄村乡、北部雅溪镇和南部峰源乡部分地区水源涵养功能较高。2001年水源涵养深度为98.40 mm，南部峰源乡、莲都林场和东北部黄村乡水源涵养功能好于其他地区，个别地区水源涵养深度达到300 mm以上，中部地区水源涵养功能较低；水源涵养深度较大的区域面积明显增大。2008年研究区水源涵养深度为82.36 mm，水源涵养功能空间格局整体与1994年相似，但略好于1994年。2015年水源涵养深度为114.01 mm，水源涵养功能较高的地区为南部峰源乡和莲都林场，其次是东北部黄村乡和雅溪镇，水源涵养功能较低的区域主要分布在中部白云街道、万象街道、南明山街道和碧湖镇等地。水源涵养深度较大的区域面积明显进一步增大。1994–2001年，研究区水源涵养深度仅中部城镇和农田呈现减少趋势，其他地区均有不同程度的增长，大部分地区增长量为20–40 mm，部分地区增长量达40 mm以上。2001–2008年，研究区水源涵养功能下降明显，其中北部和中部地区降幅较大。2008–2015年，研究区水源涵养功能增长迅速，其中中部和北部地区水源涵养功能变化最为剧烈，南部地区水源涵养功能已处于较高水准，因此增长并不明显。1994–2015年，研究区各地区水源涵养功能均有不同程度的增长，其中南部峰源乡和莲都林场尤为明显，其次是莲都区北部黄村乡、雅溪镇、岩泉街道和太平乡等地，中部地区虽有一定程度的提高，但部分地区水源涵养功能仍处于较低的水平。对比土地覆被类型变化和水源涵养功能可以看出，森林植被面积的提高能有效改善区域水源涵养功能状况。不过研究区2008年由于整体降水量较低，导致当年水源涵养量并不理想。

3.2.4 影响因子分析与模型精度验证 选取2015年研究区水源涵养结果及其相关的12项因子(降水量、潜在蒸发量、植物可利用水、土壤深度、流速系数、土壤饱和导水率、地形指数、数字高程数据、实际蒸散量、森林面积比例、裸地城镇面积比例和阔叶、针阔混交林面积比例)，基于Arc GIS平台，使用Arc GIS流域分析算法，将研究区划分为122个小流域，并以小流域为单位统计水源涵养量及各因子平均值。利用SPSS 19.0对统计数据逐步回归分析，保留显著因子、剔除非显著因子，方程最后得到 R^2 为0.894，表明方程拟合程度较好，可信程度较高。由表4可知：土壤饱和导水率对研究区水源涵养

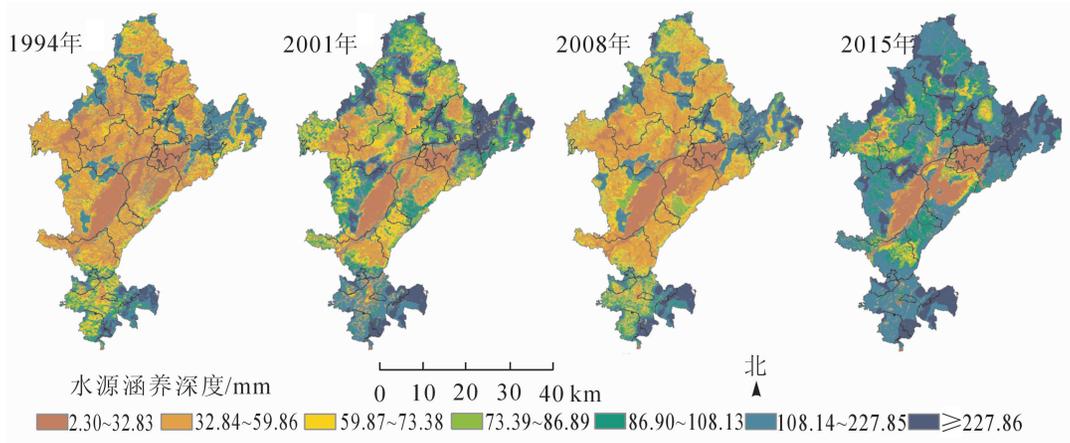


图 3 研究区水源涵养空间分布图

Figure 3 Spatial distribution characteristics of water retention in Liandu District

表 4 水源涵养功能影响因素

Table 4 Influencing factors of water retention

因素	标准化系数	显著性	偏相关性	方差膨胀因子
土壤饱和导水率	0.644	0.000	0.824	1.842
阔叶、针阔混交林面积比例	0.245	0.000	0.426	2.546
降水量	0.194	0.000	0.344	2.633
实际蒸散量	-0.225	0.000	-0.336	3.731
裸地、城镇面积比例	-0.171	0.004	-0.267	3.583

功能的正面影响最大，阔叶、针阔叶混交林面积比例和降水量的正面影响次之，并且土壤饱和导水率会随着植被的改善和群落的演替而提高^[27-28]，因此，森林结构的改善将进一步改善水源涵养；裸地、城镇面积比例有较高的负面影响，实际蒸散量的负面影响程度相对较小，但具有较高的负相关性。由此可以看出：影响研究区水源涵养功能的因素主要可分为两大类：气候因素和下垫面特征，其中下垫面特征对水源涵养功能的影响程度更高。下垫面特征因素表明当区域内土壤属性改善，阔叶林、针阔混交林面积增加，裸地及城镇面积减少时，相应的会增强区域内的水源涵养功能。气候因素表明当区域内获得更多的降水，并同时减少蒸散的情况下，水源涵养功能将随着提高。以上因素是相辅相成，共同对水源涵养功能发挥作用的。研究区 1994-2015 年水源涵养功能提高的原因，主要是 21 a 间研究区森林面积的增加和结构的改善。

3.3 研究区 2030 年水源涵养能力的预测

3.3.1 土地覆被预测变化分析 基于 1994 和 2001 年土地覆被类型分类结果数据，利用 CA-Markov 模型对莲都区 2015 年的土地覆被类型进行模拟，利用模拟结果与 2015 年土地覆被实际类型进行对比，检验其精度，得到 Kappa 系数为 0.72，为中等一致性，模拟结果可信。基于 2001 和 2015 年土地覆被类型分类结果，利用 CA-Markov 模型对 2030 年莲都区土地覆被类型进行模拟预测(表 5)。如图 4 所示：研究区 2030 年土地覆被类型整体与 2015 年差异不大。城镇、阔叶林、竹林和针阔混交林均有不同程度的增长，其中针阔混交林增幅最大，面积和比例分别增长了 $3.40 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 2.27%，城镇、阔叶林和竹林的面积比例分别增长了 1.10%，1.81% 和 1.49%。针叶林、灌木林、裸地、农田和水体呈现下降趋势，其中针叶林降幅最大，面积和比例分别下降了 $9.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 6.37%；裸地、农田、水体和灌木林略有下降，降幅较小。从空间上来看，2015-2030 年，研究区北部变化相对明显，原有针叶林逐渐被阔叶林、

表 5 研究区 2030 年土地覆被类型预测

Table 5 Area prediction of land cover of Liandu District in 2030

土地覆被类型	面积/($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	比例/%	土地覆被类型	面积/($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	比例/%	土地覆被类型	面积/($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	比例/%
裸地	0.25	1.66	水体	0.14	0.93	阔叶林	2.44	16.21
农田	1.13	7.52	针叶林	5.13	34.09	竹林	1.59	10.56
城镇	1.26	8.38	灌木林	0.21	1.40	针阔混交林	2.89	19.25

针阔混交林和竹林替代,变化部分主要发生于斑块交接区域。研究区城镇在原有基础上稳定发展,在瓯江两岸逐渐扩张并相互连接,同时碧湖镇的村落也逐步发展增大。虽然研究区城镇发展分布广泛,但由于研究区城镇周边公益林面积较大,限制了城镇的向外快速扩张。

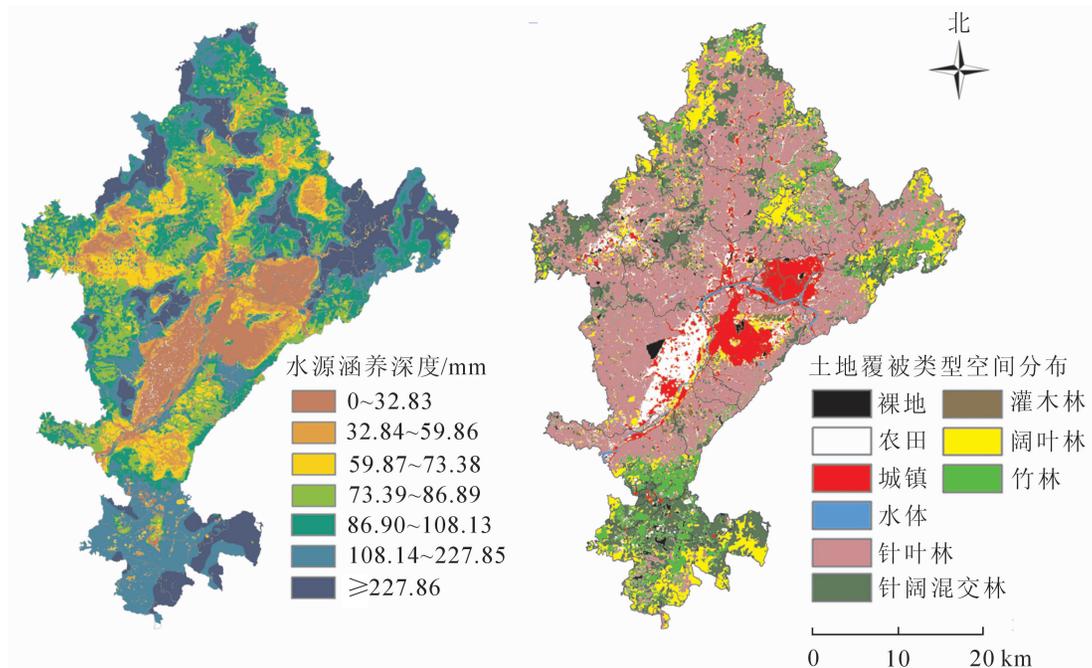


图4 2030年研究区土地覆被类型和水源涵养功能预测

Figure 4 Prediction of land cover and water retention of Liandu District in 2030

3.3.2 水源涵养能力预测分析 预测结果显示,研究区2030年水源涵养总量为 $1.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,水源涵养深度为112.90 mm,与2015年相比整体差异较小,略有下降。2030年研究区水源涵养能力最好为峰源乡和黄村乡,其水源涵养深度分别为228.27和223.29 mm,其次为莲都林场、市白云山林场、岩泉街道、雅溪镇、太平乡、紫金街道和老竹畲族乡,水源涵养深度均在100 mm以上,其余乡镇地区水源涵养深度均在100 mm以下。黄村乡和雅溪镇水源涵养总量较高,分别为 $2.32 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $2.23 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。根据模拟结果来看,莲都区在未来增强水源涵养功能的任务仍十分艰巨。重点应该关注北部和西部地区,这2个地区有较高的水源涵养潜力。建议对其林型结构进行逐步改善,提高当地的生物多样性水平,增强生态系统稳定性。南部地区为水源涵养最高的地区,应该继续维护其目前的森林建设水平,保持现状。中部地区是以城镇分布为主,难以实现较好的水源涵养能力。因此,应该注重城镇周边山体植被修复和城市内部绿地建设,有效利用各类绿地,提高单位面积的水源涵养能力。

4 结论与讨论

1994–2015年,莲都区土地覆被类型变化明显,森林面积和结构改善显著。针阔混交林、阔叶林和竹林面积分别增加了 1.42×10^4 , 1.06×10^4 和 $0.84 \times 10^4 \text{ hm}^2$,裸地面积减少了 $1.91 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。森林面积的增加有效地改善生态系统环境,有利于莲都区水源涵养功能建设和区域可持续发展。

21 a间,莲都区水源涵养功能提高了69.92%,其中前期的增速要高于后期;从空间分布上来看,莲都区水源涵养功能南部地区好于北部地区,中部地区最差,其中雅溪镇和黄村乡的水源涵养功能最好,21 a间水源涵养深度分别提高了82.70和92.73 mm,万象街道的水源涵养功能最差,21 a间仅提高了1.10 mm。

2030年模拟结果显示,莲都区水源涵养功能与2015年差异不大,水源涵养深度和总量分别为112.90 mm和 $1.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,西部和北部地区水源涵养提升潜力较大。

气候因素和下垫面特征是影响莲都区水源涵养功能的2个主要因素。下垫面因素中,土壤饱和导水率和不同土地覆被类型的面积比例对水源涵养功能有重要影响;在气候因素变化难以控制情况下,唯一

措施就是通过改善植被来提高区域水源涵养功能, 保障区域水资源安全。

5 参考文献

- [1] LEEMANS H B J, de GROOT R S. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human well-being: a framework for assessment [J]. *Physiol Technol*, 2003, **34**(9): 534.
- [2] GRIZZETTI B, LANZANOVA D, LIQUETE C, *et al.* Assessing water ecosystem services for water resource management [J]. *Environ Sci Policy*, 2016, **61**: 194 – 203.
- [3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, **69**(9): 1295 – 1304.
CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, *et al.* Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of northwest China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2014, **69**(9): 1295 – 1304.
- [4] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(3): 529 – 534.
ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, *et al.* Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28**(3): 529 – 534.
- [5] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 789 – 797.
FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, *et al.* Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(3): 789 – 797.
- [6] POLASKY S, NELSON E, PENNINGTON D, *et al.* The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the State of Minnesota [J]. *Environ Resour Econ*, 2011, **48**(2): 219 – 242.
- [7] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, *et al.* Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. *Front Ecol Environ*, 2009, **7**(1): 4 – 11.
- [8] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, *et al.* Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2013, **165**(1751): 6 – 18.
- [9] SÁNCHEZ-CANALES M, BENITO A L, PASSUELLO A, *et al.* Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed [J]. *Sci Total Environ*, 2012, **440**(1): 140 – 153.
- [10] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services [J]. *J Environ Manage*, 2011, **92**(10): 2403 – 2409.
- [11] 周彬. 基于生态服务功能的北京山区森林景观优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
ZHOU Bin. *Forest Landscape Optimization based on Ecosystem Services for Mountainous Area of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [12] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, **35**(4): 664 – 676.
BAO Yubin, LI Ting, LIU Hui, *et al.* Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model [J]. *Geogr Res*, 2016, **35**(4): 664 – 676.
- [13] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 711 – 717.
BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, *et al.* Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: based on InVEST model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(3): 711 – 717.
- [14] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 183 – 189.
PAN Tao, WU Shaohong, DAI Erfu, *et al.* Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(1): 183 – 189.
- [15] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
JIA Fangfang. *InVEST Model Based Ecosystem Services Evaluation with Case Study on Ganjiang River Basin* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [16] 王纪伟, 刘康, 瓮耐义. 基于 In-VEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(5): 213 – 217.
WANG Jiwei, LIU Kang, WENG Naiyi. Research on water conservation service function of forest ecological system in

- upstream of Hanjiang River based on In-VEST model [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2014, **34**(5): 213 – 217.
- [17] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, **32**(5): 414 – 418.
YANG Guoqing, LIU Yaolin, WU Zhifeng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model [J]. *Geom Inf Sci Wuhan Univ*, 2007, **32**(5): 414 – 418.
- [18] 陈燕芬. 浙江省丽水市莲都区公益林森林资源动态变化研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.
CHEN Yanfen. *Dynamic Analysis of Public Welfare Forest Resource in Liandu, Lishui, Zhejiang* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011.
- [19] 蒋狄微. 宁波市土地利用/覆被时空变化分析和预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
JIANG Diwei. *Spatiotemporal Analysis and Prediction of Land Use/Land Cover Changes in Ningbo City* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [20] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. 资源科学, 2011, **33**(6): 1195 – 1203.
ZHANG Jinghua, FENG Zhiming, JIANG Luguang. Progress on studies of land use/land cover classification systems [J]. *Resour Sci*, 2011, **33**(6): 1195 – 1203.
- [21] 孙侦, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. IPCC AR5 全球气候模式模拟的中国地区日平均降水精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2016, **18**(2): 227 – 237.
SUN Zhen, JIA Shaofen, LÜ Aifeng, *et al.* 2016. Precision estimation of the average daily precipitation simulated by IPCC AR5 GCMs in China [J]. *J Geo-inf Sci*, 2016, **18**(2): 227 – 237.
- [22] 廖要明, 张强, 陈德亮. 中国天气发生器的降水模拟[J]. 地理学报, 2004, **59**(5): 689 – 698.
LIAO Yaoming, ZHANG Qiang, CHEN Deliang. Precipitation simulation in China with a weather generator [J]. *Acta Geogr Sin*, 2004, **59**(5): 689 – 698.
- [23] 杨会. 浙江省生态公益林主要林分类型水土保持功能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
YANG Hui. *Research on Soil And Water Conservation of Several Vegetation Types of Ecological Forest in Zhejiang* [D]. Nanjing: Nanjing Forest University, 2007.
- [24] COSBY B J, HORNBERGER G M, CLAPP R B, *et al.* A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. *Water Resour Res*, 1984, **20**(6): 682 – 690.
- [25] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
ZHOU Wenzuo. *A Study on Available Water Capacity of Main Soil Types in China based on Geographic Information System* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [26] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, **33**(4): 1019 – 1030.
WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, *et al.* Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(4): 1019 – 1030.
- [27] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和和导水率的影响[J]. 农业工程学报. 2010, **26**(11): 78 – 84.
PENG Shunlei, YOU Wenhui, SHEN Huitao. Effect of syndynamic on soil saturated hydraulic conductivity [J]. *Trans CSAE*, 2010, **26**(11): 78 – 84.
- [28] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和和导水率的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(2): 636 – 642.
LIANG Xiangfeng, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, *et al.* Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(2): 636 – 642.