

InVEST 模型水源涵养模块实地应用的可行性验证

邱问心¹, 张 勇², 俞佳骏¹, 张 超¹, 郑超超¹, 余树全¹

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省林业生态工程管理中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 以浙江省杭州市临安区水涛庄水库集水区为研究对象, 在研究区 2015 年森林类型勘测分析的基础上, 基于水量平衡法、综合蓄水法和 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型对研究区水源涵养功能进行评价, 并分别用总量数据和样点数据对 InVEST 模型水源涵养模块在研究区的可行性进行验证。结果表明: 根据森林主林层优势树种可将研究区的森林可分为 11 个类型。基于出入库水量监测数据计算可知研究区 2015 年总水源涵养量为 $2\,738.31 \times 10^4 \text{ m}^3$, 基于综合蓄水法计算可知研究区 2015 年森林水源涵养量为 $3\,498.86 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。基于 InVEST 模型计算可知研究区 2015 年总水源涵养量为 $3\,193.90 \times 10^4 \text{ m}^3$, 模拟值精度达 83.36%; 森林水源涵养量为 $3\,189.73 \times 10^4 \text{ m}^3$, 模拟精度为 91.27%; 各林型水源涵养量精度为 89.86%。以基于综合蓄水法计算的样点水源涵养量为基准, 对 InVEST 模型的各项点模拟值进行回归验证, R^2 为 0.635 4, 模型精度为 74.15%。由此可知, 利用 InVEST 模型对研究区水源涵养进行测算可行的, 具有较高的推广价值。图 4 表 5 参 22

关键词: 森林生态学; InVEST 模型; 水源涵养功能; 水涛庄水库集水区; 模型验证

中图分类号: S715 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)05-0810-08

Feasibility verification with field application of a water conservation module using the InVEST Model

QIU Wenxin¹, ZHANG Yong², YU Jiajun¹, ZHANG Chao¹, ZHENG Chaochao¹, YU Shuquan¹

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Forest Ecological Engineering Administration, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: Water conservation, one of the most important types of ecosystem services, not only reflects the ability of an ecosystem to maintain a water supply, but also shows how much water humans use. Although the InVEST model has been used in China for a long time, there is still a lack of feasibility verification of the results. To verify the feasibility of the model and assist in water source protection planning, evaluation and simulation of water conservation were studied in the Shuitaozhuang Reservoir Watershed. The water conservation capacity of the research area was calculated by monitoring data and by using a comprehensive storage method, and then these two methods were used to verify the correctness of the InVEST Model using a precision analysis and a regression analysis. Results showed that according to monitoring data, in 2015 the total water conservation capacity of the research area was $2\,738.31 \times 10^4 \text{ m}^3$; whereas, with the comprehensive storage method the forest water conservation capacity was $3\,498.86 \times 10^4 \text{ m}^3$. The InVEST Model calculated that in 2015 the total water conservation was $3\,193.90 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the forest water conservation capacity was $3\,189.73 \times 10^4 \text{ m}^3$. Compared with monitoring data, the accuracy of the InVEST Model was 83.36%. Based on the water conservation capacity of sample points measured by the comprehensive storage method, the InVEST Model simulation value was verified by regression analysis ($R^2 = 0.635\,4$). Thus, the InVEST Model was accurate for this area and could be

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-11-08

基金项目: 浙江省科技厅重点研发计划资助项目(2017C02028)

作者简介: 邱问心, 从事森林生态研究。E-mail: qiuqi.luoyu@qq.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林生态学和恢复生态学等研究。E-mail: yushq@zafu.edu.cn

effective in water conservation to provide a reference for optimization and promotion of forest water conservation in Zhejiang and even subtropical areas. [Ch, 4 fig. 5 tab. 22 ref.]

Key words: forest ecology; InVEST Model; water conservation; Shuitaozhuang reservoir watershed; model verification

在全球水资源需求不断增加和水环境急剧恶化的背景下,森林在涵养水源、调节径流、增加区域可利用的水资源、调节河川流量、减少洪涝灾害等方面的意义更加突出。越来越多的人关注到了森林生态系统的水源涵养功能^[1]。常用的测量水源涵养功能的方法有土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、林冠截留剩余量法、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^[2]等,但均在展现区域水源涵养功能的空间分布上不够直观;近年来,由斯坦福大学和大自然保护协会共同开发的用以直观评价水源涵养功能的 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型^[3]被广泛地应用于森林生态功能尤其是水源涵养功能研究。中国有不少学者在北京山区^[4]、都江堰^[1]、白洋淀^[5]、三江源地区^[6]、黄土高原^[7]、赣江流域^[8]和汉江上流^[9]、商洛市^[10]等对当地的产水量或水源涵养的空间格局等进行了分析与评价,参数经本地化处理后的 InVEST 模型能为区域生态规划发挥较好的指导作用;但对于模型模拟结果的精度验证与分析的研究较少,有待进一步完善。本研究以浙江省杭州市临安区水涛庄水库 2015 年水文监测数据为基础,通过野外调查和森林资源二类调查数据获得该水库集水区森林类型、分布、土壤等相关参数,利用综合蓄水法和水量平衡公式计算水源涵养量,并用 InVEST 模型对水源涵养模块的模拟结果进行精度验证,为今后 InVEST 模型在浙江省乃至亚热带地区的推广应用提供参考依据。

1 研究区概况

水涛庄水库位于中茗溪上游,地处浙江省杭州市临安区高虹镇,建成于 2003 年,具体区位如图 1 所示。集水区坝址位于水涛庄村上游约 500 m 处,距临安城区 16 km,是一个以防洪为主,兼顾灌溉、发电、供水及改善水环境等多种效益的水利建设项目。水库总库容 $2\ 888 \times 10^4\ \text{m}^3$,设计洪水位 150.97 m,正常蓄水位 141.17 m,相应正常库容 $1\ 677 \times 10^4\ \text{m}^3$,多年平均降水量 1 463.6 mm。研究区集水面积为 $5\ 756.04\ \text{hm}^2$,其中森林面积为 $5\ 362.83\ \text{hm}^2$,占研究区总面积的 93.17%。样地主要树种有马尾松 *Pinus massoniana*,白栎 *Quercus fabri*,短柄枹栎 *Q. serrata* var. *brevipetiolata*,青冈栎 *Cyclobalanopsis championii*,麻栎 *Q. acutissima*,杉木 *Cunninghamia lanceolata*,毛竹 *Phyllostachys edulis*,高节竹 *Phyllostachys prominens*,山核桃 *Carya cathayensis*,金钱松 *Pseudolarix amabilis*,油茶 *Camellia oleifera*。

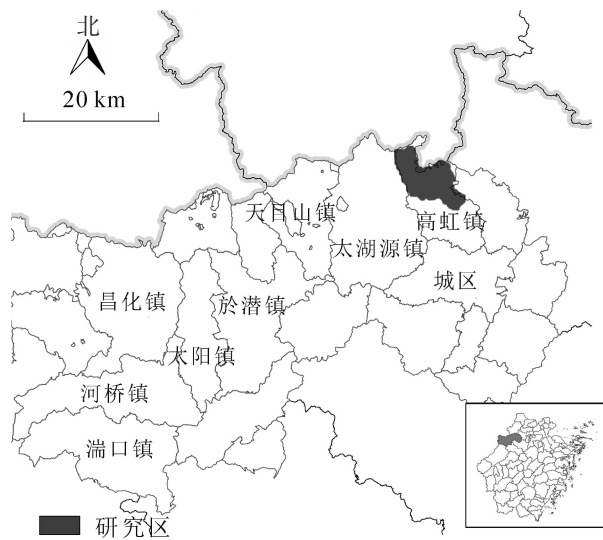


图 1 研究区区位图

Figure 1 Location of research area

2 研究方法

2.1 样地设置与调查方法

研究区地表可分为 14 种覆被类型,其中森林类型 11 种。为调查各林型森林群落特征,根据森林群落类型分布,在各林型内设置 5 个 $20\ \text{m} \times 20\ \text{m}$ 的样点,共 55 个。在设置的样地内分别取 $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$ 的凋落物样方 3 个,测量凋落物层厚度,收集表面凋落物并带回实验室;选择具有代表性的样点,划出 $1.5\ \text{m} \times 1.0\ \text{m}$ 的长方形地块,采用环刀(直径 6.18 cm,高 4.00 cm)挖取土壤剖面,在 0~20 cm 层划分成 2~3 层采集原始土块,重复 3 次·层⁻¹,不破坏环刀内土壤结构,且环刀内无石块或粗根。

2.2 基于水量平衡法的水源涵养评价方法

研究区为封闭的水库集水区,森林内的径流最终汇集在水库内,水库年入库量即区域年径流量,根据水量平衡相关理论,可计算出研究区水源涵养量 $W_c=(P-E-R_{\text{off}})A$ 。其中: W_c 为研究区森林水源涵养量(m^3); P 为年降水量(mm); E 为年蒸散量(mm)^[11-12],根据研究区蒸散量逐日值(E_{to})统计相加后得出,其中逐日值基于气象站逐日数据并利用修改后的彭曼-蒙蒂思公式(FAO Penman-Monteith)计算得出式(1)^[13]; R_{off} 为年径流量(mm); A 为研究区总面积。

$$E_{\text{to}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + V \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + V(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

式(1)中: R_n 为地表净辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); V 为干湿表常数($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$); T 为2 m高度处平均气温(C); U_2 为2 m高度处风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$)^[13]。

2.3 基于综合蓄水法的水源涵养评价方法

2.3.1 凋落物层水源涵养功能研究 将收集的凋落物带回实验室称量,并取部分样品烘干(85 C , 24 h),推算 1 hm^2 的凋落物储量。同时取部分烘干试样,用清水浸泡24 h后取出,滤去多余水分,称量后得出样品饱和持水率,计算凋落物层的最大持水量(率)和有效持水率。

2.3.2 土壤层水源涵养功能研究 用环刀法^[14]测定土壤容重、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度。环刀内土样浸泡饱和后,放置于干沙上,分时段称量,计算出不同类型林分土壤持水量与时间的函数关系式和持水速率。计算土壤容重 $d=(M_2-M_1)/V$,其中: M_1 为环刀的质量(g); M_2 为环刀和干土壤的总质量(g); V 为环刀容积(cm^3)。土壤毛管持水量=(在干沙上放置2 h后环刀内湿土质量-环刀内干土质量)/环刀内干土质量 $\times 100\%$ 。土壤非毛管孔隙度($\%$)=[(土壤饱和持水量-土壤毛管持水量) \times 土壤容重]/水的比重。土壤毛管孔隙度($\%$)=(土壤毛管持水量 \times 土壤容重)/水的比重。

2.4 InVEST 模型水源涵养评价方法

InVEST 模型水源涵养模块基于水量平衡原理,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^[7]。本研究对各参数和数据作了本地化处理以增强模型适用性。以2015年资源3号影像为影像数据源;森林植被数据主要来源于森林资源二类调查数据及野外样地调查;降水量等气候数据根据临安区及周边地区气象站记录的2015年数据插值获得;土壤相关性质由野外样地调查及实验室分析获得,其中:土壤饱和导水率^[15]基于1:50万浙江省土壤数据并利用COSBY等^[16]的土壤传递函数计算获得;植被可利用水根据外业调查所得田间持水量数据,并参考周文佐^[17]的研究结果处理获得;地形数据来源于日本地球遥感数据分析中心(ERSDAC)提供的30 m分辨率数字高程模型(DEM)数据。

模型运行结果为产水量。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^[1],计算水源涵养深度 $R=\min(1, 249/V)\times\min(1, 0.9I_T/3)\times\min(K_{\text{sat}}/300)\times Y$ 。其中: V 为流速系数; I_T 为地形指数,无量纲; K_{sat} 为土壤饱和导水率($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$); Y 为产水量(mm)。将水源涵养深度经过单位换算后乘以 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的栅格面积可得到研究区水源涵养量(m^3),将研究区水源涵养量除以研究区总面积后可得出单位面积水源涵养量($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)。

3 结果分析

3.1 研究区地表覆被类型

根据临安区森林资源二类调查小班清查矢量数据及野外样地调查的研究区地表覆被类型进行分类,研究区地表可分为不透水面、耕地、山核桃林、油茶林、毛竹林、高节竹林、马尾松林、杉木林、金钱松林、麻栎林、短柄枹栎林、青冈栎林、马尾松-白栎-短柄枹栎混交林和水体等14个类型(图2)。

基于研究区森林主林层优势树种,将研究区的森林分为11个类型,不同类型的面积如表1所示。其中:毛竹林的面积最大,油茶林次之,金钱松林最小。

3.2 基于 InVEST 模型的研究区水源涵养功能评价

基于 InVEST 模型对研究区的水源涵养功能进行评价,并利用 Arc GIS 平台对研究区水源涵养功能的分布情况和水源涵养量进行模拟与汇总。图3各值为平均水源涵养深度(mm),数值越大表示水

表 1 研究区各森林类型面积统计表

Table 1 Forest area in research area

序号	森林类型	面积/hm ²	占研究区总面积/%	序号	森林类型	面积/hm ²	占研究区总面积/%
1	马尾松林	264.24	4.59	7	短柄枹栎林	667.53	11.60
2	杉木林	200.07	3.48	8	毛竹林	1 214.73	21.09
3	金钱松林	133.02	2.31	9	高节竹林	759.33	13.19
4	马尾松-白栎-短柄枹栎混交林	375.12	6.52	10	山核桃林	170.46	2.96
5	青冈栎林	298.80	5.19	11	油茶林	1 136.88	19.74
6	麻栎林	143.28	2.49		合计	5 362.83	93.17

源涵养功能越好。根据数据汇总可知研究区水源涵养量为 $3\ 193.90 \times 10^4\ \text{m}^3$ ，其中森林与耕地的水源涵养量分别为 $3\ 189.73 \times 10^4$ 和 $4.17 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。

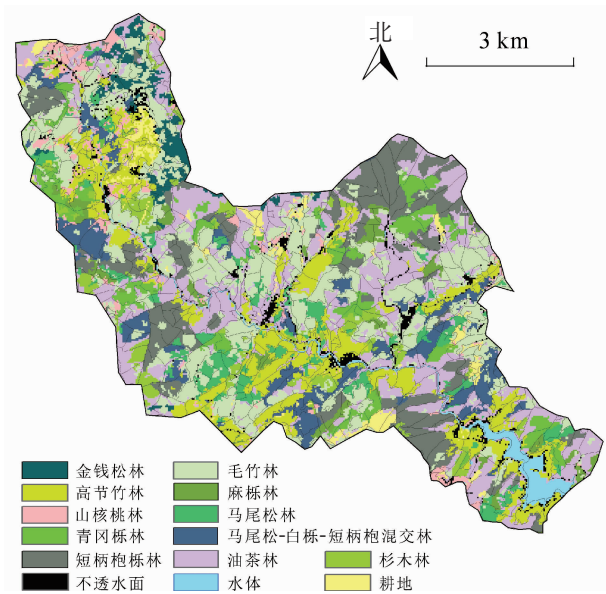


图 2 地表覆被类型分布图

Figure 2 Spatial characteristic of land cover types

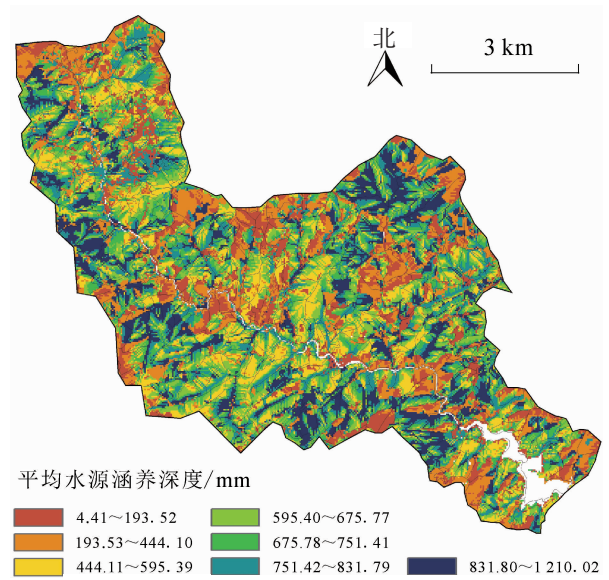


图 3 研究区水源涵养功能空间分布图

Figure 3 Spatial distribution of water conservation in research area

由表 2 可知：阔叶林、针阔混交林水源涵养能力较强，而针叶林、竹林居中，山核桃林和油茶林水源涵养能力最弱。其中，毛竹林虽然水源涵养能力不强，但由于其覆盖面积较大，因此水源涵养量最高，为 $832.15 \times 10^4\ \text{m}^3$ ；短柄枹栎林次之，而水源涵养能力较好的马尾松-白栎-短柄枹栎混交林的水源涵养量不高，为 $338.65 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。山核桃林的水源涵养量最低，仅为 $39.76 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。平均单位面积森林水源涵养量为 $5\ 548.17\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.3 基于水量平衡法的水源涵养量与模型模拟值精度验证

测量研究区年降水量为 1 996.60 mm，水库年入库水量为 5 947.15 mm，基于 FAO Penman-Monteith 公式计算得到研究区年蒸散量为 457.67 mm。相关研究表明：年蒸散量受年平均日照时数与降水量等气

表 2 基于 InVEST 模型的研究区不同森林类型水源涵养功能

Table 2 Water conservation of research area in different forest types based on InVEST Model

序号	森林类型	水源涵养总量/($\times 10^4\ \text{m}^3$)	单位面积水源涵养量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	序号	森林类型	水源涵养总量/($\times 10^4\ \text{m}^3$)	单位面积水源涵养量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	马尾松林	160.20	6 062.76	7	短柄枹栎林	534.47	8 006.67
2	杉木林	118.66	5 930.83	8	毛竹林	832.15	6 851.51
3	金钱松林	85.27	6 410.30	9	高节竹林	495.85	6 530.90
4	马尾松-白栎-短柄枹栎混交林	338.65	9 027.91	10	山核桃林	39.76	2 337.29
5	青冈栎林	241.15	8 070.76	11	油茶林	231.37	2 035.80
6	麻栎林	111.85	7 806.63		合计	3 189.73	5 548.17

象因子的影响较大,平均日照时数越小降水量越大则越不利于蒸发^[18-19]。由于研究区2015年年蒸散量监测数据缺失,因而将研究区2015年计算值分别与2010年、2013年周边监测站监测值进行对比^[20-21],以分析公式计算的年蒸散量的可行性。结果显示(表3):研究区2015年年蒸散量略低于2010与2013年的监测值,分别为另两年的68.33%与63.46%。分析原因,研究区2015年的年平均日照时数远小于2010与2013年,降水量则远大于2010与2013年监测值;同时研究区为水库库区,空气相对潮湿,不利于蒸散;研究区的森林类型与覆盖度与其他地区也存在一定的差异,导致其对水分的蒸散作用存在差异。因而运用FAO Penman-Monteith公式计算研究区年蒸散量具有一定的可行性。

表3 研究区蒸散量计算值可行性分析

Table 3 Feasibility analysis of evapotranspiration calculation in research area

研究区域	年份	年总日照时数/h	年降水量/mm	年蒸散量/mm
水涛庄水库	2015	1 437.40	1 966.60	457.67
太湖源	2010	1 836.70	1 201.72	669.84
天目山	2013	1 927.10	1 401.70	721.25

根据水量平衡相关理论可知:研究区2015年的年水源涵养量为 $2\ 738.31 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。利用InVEST模型计算得到的年水源涵养量为 $3\ 193.90 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。与测量值相比,两者在数值上较为接近;以水库监测数据为基准值,InVEST模型水源涵养模块模拟精度为83.36%。

3.4 基于综合蓄水法计算的森林水源涵养量与模型模拟值精度验证

森林的水源涵养功能是指森林生态系统通过林冠层、凋落物层和土壤层对降水进行再分配,从而有效涵养水分、调节径流的功能。本方法通过对研究区以上3个环节蓄水能力的分析,获得森林的水源涵养功能。监测可知(表4):凋落物截留量为 $9.17 \times 10^4\ \text{m}^3$,土壤水源涵养量为 $2\ 108.41 \times 10^4\ \text{m}^3$,参考不同地区相关研究^[22]得到的林冠截留量为 $1\ 307.55 \times 10^4\ \text{m}^3$;计算得到森林总的水源涵养量为 $3\ 425.12 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。InVEST模型得到结果较综合蓄水法略低,模拟值为实测值的91.27%,分析原因主要是因为综合蓄水法在样地选择过程中多选取林分较密,林相较好,生长较为旺盛的区域。但各林型水源涵养量数值较为接近,以综合蓄水法结果为基准值,InVEST模型水源涵养模块得出的各林型水源涵养量平均精度为89.86%。

表4 基于综合蓄水法的研究区森林水源涵养量与模型模拟值精度验证

Table 4 Accuracy comparison of forest total water conservation of different forests in research area

序号	森林类型	林冠截留量/ ($\times 10^4\ \text{m}^3$)	凋落物截留量/ ($\times 10^4\ \text{m}^3$)	土壤水源涵养 量/($\times 10^4\ \text{m}^3$)	森林水源涵养 量/($\times 10^4\ \text{m}^3$)	模型模拟结 果/($\times 10^4\ \text{m}^3$)	精度/%
1	马尾松林	92.50	0.28	89.95	182.73	160.20	85.94
2	杉木林	68.86	0.17	60.24	129.26	118.66	91.07
3	金钱松林	47.09	0.16	57.27	104.52	85.27	77.42
4	马尾松-白栎-短柄枹栎混交林	152.71	1.65	196.02	350.38	338.65	96.54
5	青冈栎林	114.00	0.72	143.65	258.37	241.15	92.86
6	麻栎林	49.59	0.34	66.73	116.66	111.85	95.70
7	短柄枹栎林	250.74	1.35	306.62	558.71	534.47	95.46
8	毛竹林	308.17	1.71	571.60	881.48	832.15	94.07
9	高节竹林	200.10	0.78	305.63	506.51	495.85	97.85
10	山核桃林	23.80	0.27	20.56	44.63	39.76	87.75
11	油茶林	0.00	1.74	290.13	291.88	231.37	73.85
	合计/平均	1 307.55	9.17	2 108.41	3 425.12	3 189.73	89.86

基于综合蓄水法与InVEST模型计算的研究区单位面积水源涵养量对比如表5所示。不同森林类型水源涵养功能不同,综合蓄水法计算可知各类型水源涵养功能由强到弱依次为马尾松-白栎-短柄枹栎混交林>青冈栎林>短柄枹栎林>麻栎林>金钱松林>毛竹林>马尾松林>高节竹林>杉木林>山核桃林>油茶林;InVEST模型模拟结果则表现为马尾松-白栎-短柄枹栎混交林>青冈栎林>短柄枹栎林>麻

栎林>毛竹林>高节竹林>金钱松林>马尾松林>杉木林>山核桃林>油茶林, 与综合蓄水法结果较为吻合。

表 5 基于综合蓄水法的不同林型单位面积水源涵养功能与模型模拟值对比

Table 5 Accuracy comparison of average forest water conservation of different forests in research area

序号	森林类型	林冠截留量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	凋落物截留/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤涵养/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	森林水源涵养功 能/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	模型模拟结果/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	马尾松林	3 500.55	10.62	3 404.05	6 915.22	6 062.76
2	杉木林	3 441.55	8.30	3 010.80	6 460.65	5 930.83
3	金钱松林	3 539.88	12.26	4 305.60	7 857.74	6 410.30
4	马尾松-白栎-短柄枹混交林	4 070.86	43.97	5 225.60	9 340.43	9 027.91
5	青冈栎林	3 815.20	24.15	4 807.50	8 646.85	8 070.76
6	麻栎林	3 461.22	23.72	4 657.10	8 142.04	7 806.63
7	短柄枹栎林	3 756.21	20.17	4 593.40	8 369.78	8 006.67
8	毛竹林	2 536.91	14.04	4 705.60	7 256.56	6 851.51
9	高节竹林	2 635.24	10.29	4 025.00	6 670.54	6 530.90
10	山核桃林	1 396.29	15.82	1 206.30	2 618.41	2 337.29
11	油茶林	0.00	15.34	2 552.00	2 567.34	2 035.80

将 55 个样点的森林水源涵养实测值对 InVEST 模型模拟值进行回归分析(图 4)。由图 4 可知: 模拟值对实测值的回归方程为 $y=0.868 2x+172.14$, R^2 为 0.635 4, 模型模拟精度达 74.15%。结合以上分析, 可知 InVEST 模型的精度和可信度较高, 具有一定的可行性, 可用于实地水源涵养功能的模拟计算。

4 结论

基于综合蓄水法计算的研究区森林水源涵养量为 $3 425.12 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中林冠层截留量为 $1 307.55 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占总量的 38.18%; 凋落物截留量为 $9.17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占总量的 0.28%; 土壤层水源涵养量为 $2 108.41 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占总量的 61.56%。因此, 土壤层在森林水源涵养的过程中占主体地位。基于 InVEST 模型模拟的研究区水源涵养量为 $3 193.90 \times 10^4 \text{ m}^3$, 森林水源涵养量为 $3 189.73 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年水源涵养量占研究区年降水量的 31.35%, 水源涵养能力较好。

通过对比 2015 年基于出入库水量监测数据计算的水源涵养量和基于 InVEST 模型得出的水源涵养量, 得出 InVEST 模型水源涵养模块模拟的精度为

83.36%。表明 InVEST 模型在计算区域整体水源涵养量上具有较高的模拟精度。基于综合蓄水法计算的森林水源涵养量与 InVEST 模型模拟值相比, 精度为 91.27%; 对各林型水源涵养量而言, 模型模拟值的平均精度为 89.86%; 以 55 个样地水源涵养量的实测值, 对 InVEST 模型模拟结果进行检验, 模拟值对实测值的回归方程为 $y=0.868 2x+172.14$, R^2 为 0.635 4, 模型模拟精度达 74.15%; 马尾松-白栎-短柄枹混交林的单位面积水源涵养量为最大, 青冈栎林次之, 油茶林最小。因此可以认为 InVEST 模型在模拟各林型水源涵养功能方面亦具有较高精度。

综上所述, InVEST 模型水源涵养模块在研究区域水源涵养量和不同森林类型水源涵养功能上均具有一定的可行性和可信度。陈姗姗等^[10]在高洛市的研究发现: InVEST 模型求得的产水量与实际水资源量较为接近, 模型具有可行性; 与本研究结果基本吻合。但由于本研究在基于监测值计算水源涵养量时缺少部分往年数据, 且模型运行中也缺少往年植被数据, 因此仅对 1 a 的水源涵养量数据进行了对比。考虑到森林水源涵养功能的复杂性, 为使验证结果更加准确, 还应在接下来的研究中对多年水源涵

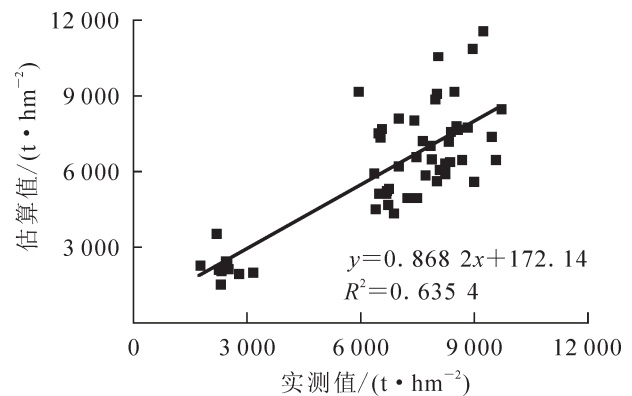


图 4 InVEST 模型精度验证

Figure 4 Model accuracy verification

养量并分析模型精度。

5 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] TALLIS H T, RICKETTS T, GUERRY A D, *et al.* *In-VEST 2.1 Beta User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* [R]. Stanford: The Natural Capital Project, 2010.
- [4] 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 Mountains Area of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 a Case Study on Ganjiang River Basin* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [9] 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.
- [10] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J]. 地理科学, 2016, **36**(10): 1546 – 1554.
CHEN Shanshan, LIU Kang, BAO Yubin, *et al.* Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo city [J]. *Sci Geogr Sin*, 2016, **36**(10): 1546 – 1554.
- [11] 刘钰, PEREIRA L S, TEIXEIRA J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997(6): 28 – 34.
LIU Yu, PEREIRA L S, TEIXEIRA J L, *et al.* Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. *J Hydraul Eng*, 1997(6): 28 – 34.
- [12] THOMAS A. Development and properties of 0.25-degree gridded evapotranspiration data fields of China for hydrological studies [J]. *J Hydrol*, 2008, **358**(3/4): 145 – 158.
- [13] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, **11**(增刊1): 128 – 136.
MAO Fei, ZHANG Guang zhi, XU Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results [J]. *Q J Appl Meteorol*, 2000, **11**(suppl 1): 128 – 136.
- [14] HOSSNER L R. Dissolution for total elemental analysis [G]. SPARKS D L, PAGE A L, HELMKE P A, *et al.* *Method*

- of Soil Analysis: Part 3, Chemical Method*. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996: 49.
- [15] 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. *Study on Soil and Water Conservation of Different Forests of Non-commercial Forest in Zhejiang Province* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [16] COSBY B J, HOMBERGER 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.
- [17] 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.
- [18] 刘普幸, 卓玛兰草. 甘肃省 1960–2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子[J]. 自然资源学报, 2012, **27**(9): 1561 – 1571.
LIU Puxing, ZHUOMA Lancao. Temporal and spatial change of the potential evaporation and its impact factors in Gansu Province [J]. *J Nat Resour*, 2012, **27**(9): 1561 – 1571.
- [19] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957–2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(2): 315 – 326.
HUANG Huiping, CAO Mingming, SONG Jinxi, *et al.* Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012 [J]. *J Nat Resour*, 2015, **30**(2): 315 – 326.
- [20] 牛晓栋, 江洪, 方成圆, 等. 天目山常绿落叶阔叶混交林生态系统水汽通量特征[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(2): 216 – 224.
NIU Xiaodong, JIANG Hong, FANG Chengyuan, *et al.* Water vapor flux features of an evergreen and deciduous broadleaf mixed forest in Mount Tianmu area [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(2): 216 – 224.
- [21] 蔺恩杰, 江洪, 陈云飞. 太湖源雷竹林水汽通量变化及其对净辐射的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(3): 313 – 318.
LIN Enjie, JIANG Hong, CHEN Yunfei. Water vapor flux variation and net radiation for a *Phyllostachys violascens* stand in Taihuyuan [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(3): 313 – 318.
- [22] 李道宁. 江西省大岗山主要森林类型水源涵养功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
LI Daoning. *Study on the Function of Water Conservation with Three Main Forest Types in Dagangshan Mountain of Jiangxi Province* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.