DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.005
周苹苹,罗艺,宋小燕,等.基于 InVEST-PLUS 模型的陕西省水源涵养量估算及预测[J].水土保持学报,2024,38(3):187-194.
ZHOU Pingping, LUO Yi, SONG Xiaoyan, et al. Estimation and prediction of water conservation capacity in shaanxi province based on the InVEST-PLUS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024, 38(3):187-194.

基于 InVEST－PLUS 模型的陕西省水源涵养量估算及预测

周苹苹[1],罗 艺[1],宋小燕[1],吴 浩[1],王 刚[2],单卫华[2],张 可[2],
刘正佳[3],张诗梅[1],李文嘉[1],李思豪[1],宋松柏[1],孙文义[4]
(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司,成都 611130;3.中科院地理科学与资源研究所,北京 100101;4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘　要:[**目的**]为估算陕西省水源涵养量。[**方法**]通过耦合 InVEST 模型和 PLUS 模型,计算陕西省 2000—2020 年水源涵养量,并预测未来 2030 年土地利用变化下的水源涵养量。[**结果**]陕西省 2000—2020 年平均水源涵养量为 132.25 mm,空间分布特征为水源涵养量由北向南逐渐增强。从植被类型来看,林地是陕西省水源涵养量的主体,年平均水源涵养量为 199.55×10^8 m^3;从行政区来看,安康市水源涵养量最大(308.96 mm)。2030 年陕西省水源涵养总量为 285.16×10^8 m^3,相比 2020 年降低 8.68×10^8 m^3。[**结论**]陕西省未来 2020—2030 年水源涵养量呈略微下降趋势。

关键词: 水源涵养;InVEST 模型;PLUS 模型;土地利用;陕西省
中图分类号:TV211.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0187-08

Estimation and Prediction of Water Conservation Capacity in Shaanxi Province Based on the InVEST-PLUS Model

ZHOU Pingping[1], LUO Yi[1], SONG Xiaoyan[1], WU Hao[1], WANG Gang[2], SHAN Weihua[2], ZHANG Ke[2], LIU Zhengjia[3], ZHANG Shimei[1], LI Wenjia[1], LI Sihao[1], SONG Songbai[1], SUN Wenyi[4]
(1.*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Chengdu Hydroeletricity Construction Enginering Co.,Ltd. of Sinohydro Bnreau NO.7 Company*, *Chengdu* 611130, *China*;
3. *Institute of Geographic Sciences and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*;
4. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study was aimed to estimate the amount of water conservation in Shaanxi Province. [**Methods**] The InVEST model and PLUS model were coupled to calculate the water conservation amount in Shaanxi Province from 2000 to 2020 and predict the water conservation amount under land use changes in the future in 2030. [**Results**] The average water conservation amount in Shaanxi Province from 2000 to 2020 was 132.25 mm, with a spatial distribution characteristic of gradually increasing water conservation from north to south. From the perspective of vegetation types, forest land was the main body of water conservation in Shaanxi Province. The average annual water conservation amount was 199.55×10^8 m^3. From the administrative region, Ankang City had the largest water conservation amount(308.96 mm). The total amount of water source conservation in 2030 will be 285.16×10^8 m^3 and 8.68×10^8 m^3 less than that in 2020. [**Conclusion**] The water conservation amount of Shaanxi Province will show a slight downward trend from 2020 to 2030 in the future.

Keywords: water conservation; InVEST model; PLUS model; land use; Shaanxi Province

Received:2023-08-28　**Revised**:2023-12-10　**Accepted**:2024-01-28　**Online**(www.cnki.net):2024-04-08

收稿日期:2023-08-28　**修回日期:**2023-12-10　**录用日期:**2024-01-28　**网络首发日期(**www.cnki.net**)**:2024-04-08
资助项目:国家自然科学基金项目(42177328,41971218);大学生创新创业训练计划创新训练项目(S202310712439)
第一作者:周苹苹(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhoupingping@nwafu.edu.cn
通信作者:宋小燕(1983—),女,副教授,博士,主要从事气象、水文干旱研究。E-mail:xiaoyansong@nwsuaf.edu.cn

水源涵养指在特定的时间和空间内生态系统对于水分的截留、渗漏和储存降水的能力和过程，对水源涵养量评估是了解生态系统服务价值的重要手段之一。水源涵养的时空变化对区域生态系统的发展具有直接影响，对下游人类的生产生活也具有重要的影响，引发新的人水交互协同效应[1]。区域水源涵养功能受到降水、蒸发及土地利用等多种因素的复合影响，故准确评估水源涵养功能具有重要意义[2]。

水源涵养评估方法主要有水量平衡法、林冠截留剩余法、降水储存量法和综合蓄水能力法等[3]。WANG 等[4]利用 InVEST 模型分析吉林省水源涵养量的时空变化特征；WEI 等[5]通过 InVEST 模型定量评估祁连山南坡 15 年的水源涵养能力，分析影响水源涵养量的主要因素；刘景红等[6]利用 SWAT 模型定量评估浑河中上游不同生态类型的水源涵养功能。

InVEST 模型更适用于大流域尺度的水源涵养功能的评估，具有数据需求少、运行速度快等优点[7]。现有的土地利用模型有 CA－Markov 模型[8]、CLUE－S 模型[9]、PLUS 模型[10]，其中，CA－Markov 模型具有模拟精度低的缺点，CLUE－S 模型模拟精度高，但该模型主要适用于微观尺度的土地利用预测，而 PLUS 模型克服以上问题，通过耦合 InVEST 模型和 PLUS 模型实现历史和未来时期水源涵养量估算，反映土地利用变化对生态系统水源涵养能力的影响，为地区水资源管理和决策提供科学依据。

陕西省位于中国西北部，南北地区降水差异较大，省内包括重要的水源涵养区秦岭及水土流失严重的黄土高原，陕西省的水源涵养研究主要侧重于水源涵养量的定量估算[11-12]，缺少水源涵养量的预测。因此，结合 InVEST 模型定量评估 2000—2020 年陕西省水源涵养功能，并对不同植被类型及行政区的水源涵养功能进行分析，预测 2030 年土地利用变化下的水源涵养量，研究结果可为未来研究水源涵养量变化以及预测土地利用提供数据支撑，对维护陕西省生态保护及高质量发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省（105°29′－111°15′E，31°42′－39°35′N）位于中国西北部，总面积约 2.056×10^5 km^2（图 1），海拔为 500～2 000 m。省内气候差异很大，年平均降水量为 576.9 mm，年平均气温为 13 ℃。横跨长江和黄河两大水系中部，是连接中国西北地区和西南地区的重要纽带。陕西秦岭是国家重要的水源地，具有较高的水源涵养能力，因此，分析水源涵养能力对于陕西生态系统稳定及持续发展具有重要意义。

1.2 数据来源与处理

InVEST 模型所需要数据有降水量、蒸发量、土地利用数据、地理高程模型等，数据来源见表 1。由于土地利用数据难以获取，因此，将 2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据分别代替 2000—2005 年、2006—2015 年、2016—2020 年的土地利用数据，将所有栅格数据统一投影到投影坐标系 Krasovsky_1940_Albers 中，利用 ArcGIS 中按掩膜提取工具将栅格数据裁剪成研究区大小，所有栅格数据重采样到 30 m×30 m。

PLUS 模型选取降水、高程、坡度、GDP、人口、水系、道路数据作为土地利用预测的输入数据，将预测得到的土地利用数据通过 InVEST 模型进行预测水源涵养量，降水和蒸发数据采用 2000—2020 年平均水量。

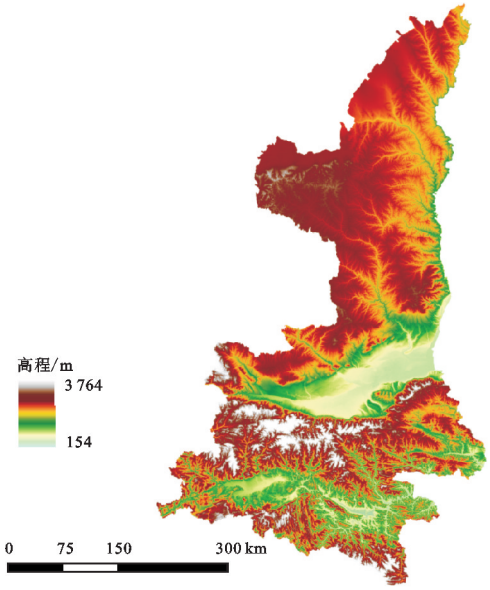

图 1 研究区概况

Fig. 1 The study area

1.3 产水量计算

采用 InVEST 模型[13]的产水量模块计算陕西省 2000—2020 年的年产水量。该模型将每个栅格单元的降水量与实际蒸散量之差定义为产水量。计算公式为：

$$Y_{xj}=\left(1-\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}\right)\times P_x \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}=\frac{1+\omega x P_{xj}}{1+\omega x P_{xj}+\frac{1}{R_{xj}}} \tag{2}$$

$$\omega=Z\frac{\mathrm{AWC}_x}{P_x} \tag{3}$$

$$\mathrm{AWC}_x=\min(\max\ \mathrm{soil_depth},\mathrm{root_depth})\times \mathrm{PAWC}_x \tag{4}$$

$$\mathrm{PAWC}_x=54.409-0.132\times\mathrm{sand}-0.003\times\mathrm{sand}\times2-0.055\times\mathrm{silt}-0.006\times(\mathrm{silt})^2-0.738\times\mathrm{clay}+0.007\times(\mathrm{clay})^2-2.688\times$$

$$OM + 0.501 \times (OM)^2 \tag{5}$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj}\, ET0_x}{P_x} \tag{6}$$

式中：Y_{xj} 为土地覆被类型 j 栅格单元 x 的年平均产水量(mm)；AET_{xj} 为土地覆被类型 j 栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm)；P_x 为栅格单元 x 年降水量(mm)；R_{xj} 为潜在蒸散发与降水量的比值；ω_x 为表达气候和土壤属性关系的非物理参数；AWC_x 为植被有效利用含水量(mm)；maxsoil_depth 为最大土壤深度(mm)；root_depth 为根系深度(mm)；PAWCx 为植物可利用水量(%)；sand 为土壤砂粒含量(%)；silt 为土壤粉粒含量(%)；clay 为土壤黏粒含量(%)；OM 为土壤有机质含量(%)；Z 参数为季节常数，根据陕西省水资源公报产水系数进行修正；$ET0x$ 为单元 x 潜在蒸散量(mm)；K_{xj} 为某植被类型的蒸散系数。

表 1　数据来源及分辨率

Table 1　Data source and resolution

数据类型	来源	分辨率
降水量	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	1 km
蒸散发	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	1 km
土地利用数据	GlobeLand30(http://www.globallandcover.com/)	30 m
根限制层深度	文献分享数据(http://globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp)	1 km
土壤数据	世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database － HWSD version 1.2)	1 km
植被可利用含水量	根据研究区土壤数据，通过公式(5)算得	
根系深度	根据植被类型，参考研究成果进行赋值	
流速系数	参考文献[12]进行赋值	
土壤饱和导水率	根据研究区土壤数据，通过公式(9)算得	
Z 参数	根据陕西省水资源公报产水系数校正	
数字高程模型	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)	30 m
道路数据、水系数据	Bigemap 软件下载(http://www.bigemap.com/)	1 km
GDP	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	1 km
人口数据	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	1 km

1.4　水源涵养量计算

基于 InVEST 模型水量平衡的估算方法，结合研究区地表流速系数、地形指数及土壤饱和导水率计算得到水源涵养量[14]，计算公式为：

$$Re = min\left(1, \frac{249}{velocity}\right) \times min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times min\left(1, \frac{ks}{300}\right) \times Y_{xj} \tag{7}$$

$$TI = lg\left(\frac{\text{Drainage_area}}{\text{soil_depth} \times \text{percent_slope}}\right) \tag{8}$$

$$ks = 609.6 \times 10^{[-0.6+0.012\times \text{sand} - 0.006\times \text{clay}]} \tag{9}$$

式中：Re 为水源涵养量(mm)；velocity 为流速系数；TI 为地形指数；ks 为土壤饱和导水率(mm/d)；Y_{xj} 为产水量(mm)；Drainage_area 为集水区汇流累积栅格数量；soil_depth 为土壤深度(mm)；percent_slope 为百分比坡度(%)；sand 为土壤砂粒含量(%)；clay 为土壤黏粒含量(%)。

1.5　冷热点分析

利用 ArcGIS 软件中的冷热点分析工具，该工具利用 GI^* 系数[15]来识别水源涵养的热点区和冷点区。对 2000—2020 年陕西省年均水源涵养量进行冷热点分析，热点区代表水源涵养量高值地区，冷点区则相反。研究运用网格分析法以 10 km×10 km 的尺度生成 2 054 个网格单元，提取各网格单元的水源涵养量进行冷热点分析。

1.6　水源涵养量模拟预测

PLUS(patch － generating land use simulation)[16]模型是基于随机森林方法的土地利用模拟预测新模型，其在 CA(cellular automat)模型的基础上对景观动态变化模拟策略等方面进行改进。模型分为用地扩张分析策略(land expansion analysis strategy，LEAS)和基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CA based on multiple random seeds，CARS)2 个模块。将预测出的土地利用数据输入到 InVEST 模型中，计算出产水量，进而预测未来的水源涵养量。

1.6.1　用地扩张分析策略(LEAS)

用地扩张分析策略[17]通过提取 2 期研究区土地利用扩张的部分数据，采用随机森林算法获取研究区各类土地利用类型发展概率及驱动因素对于各类土地类型的贡献率。随机森林计算公式为：

$$P_{i,k}^{d}(x) = \frac{\sum_{n=1}^{M} I[h_n(x) = d]}{M} \tag{10}$$

式中：d 取值为 0 或 1，1 表示有其他地类向地类 k 转变，0 表示其他任何不包含地类 k 在内的土地利用转换；$I(\cdot)$ 为决策树的知识函数；$h_n(x)$ 为第 n 个决策树的预测类型；$P_{i,k}^{d}(x)$ 为空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长的概率。

1.6.2　基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS)

CARS[18]是根据土地利用发展概率而模拟得到的

土地利用分布格局的模拟模型，计算公式为：

$$OP_{i,t}^{d=1,t} = P_{i,t}^{d} \times \Omega_{i,k}^{t} \times D_{k}^{t} \quad (11)$$

式中：$OP_{i,t}^{d=1,t}$ 为空间单元 i 处在 t 时刻向地类 k 转变的综合概率；$P_{i,t}^{d}$ 为空间单元 i 处用地类型向 k 发展的适宜性概率；D_{k}^{t} 表示未来需求对地类 k 的影响；$\Omega_{i,k}^{t}$ 表示单元 i 的邻域效应，是地类 k 的土地利用成分在下一个邻域内的覆盖比例。耕地、林地、草地、湿地、水域、建筑用地、未利用地邻域权重参数分别设置为 0.45，0.08，0.43，0，0.04，1.00，0.02。

1.6.3 模型精度验证 模型以 2000 年和 2010 年为基础预测 2020 年土地利用数据，通过 PLUS 模型中的 Kappa 统计工具对比 2020 年真实数据和模拟数据，得到总体精度为 88.36%，Kappa 精度为 82.40%，表明 PLUS 模型可以用于预测 2030 年土地利用数据。

2 结果与分析

2.1 陕西省 2000—2020 年水源涵养量分析

2.1.1 InVEST 模型精度验证 为验证模型的适用性，采用 2000—2020 年《陕西省水资源公报》地表水资源相应径流深数据作为实测数据，通过不断调节季节参数 Z，使模拟产水量更接近实测产水量，其中，2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的相对误差分别为 12.63%，3.11%，−2.16%，1.62%，9.35%，模拟值和实测值具有较高的相关性，决定系数（R^2）高达 94.16%。由此可知，InVEST 模型可用于陕西省产水量及水源涵养量计算。

2.1.2 2000—2020 年水源涵养量时空变化特征 2000—2020 年陕西省平均水源涵养量为 132.25 mm，图 2 为 2000—2020 年陕西省水源涵养量时间变化特征，水源涵养量呈先增大后减小趋势，2000—2010 年期间水源涵养量略有增加，增加速率为 2.56 mm/a，2011—2020 年水源涵养量呈现降低的趋势，降低速率为 1.35 mm/a。陕西省地处干旱与半干旱地区，降水量稀少，水源涵养量或涵养能力受控于降雨量，随降雨丰枯波动变化。2001 年陕西省属干旱年，年降水量平均为 583.6 mm，水源涵养量较低，为 80.28 mm；而 2003 年 8 月，陕西省爆发多年不遇的洪涝灾害，年降水量平均高达 838.6 mm，水源涵养量增大，达到 208.87 mm。

从图 3 可以看出，陕西省水源涵养量空间分布差异明显，水源涵养量由北向南逐渐增加，高水源涵养区主要分布在汉中市、安康市、商洛市、太白县及周至县南部，低水源涵养区主要分布在榆林市和延安市。

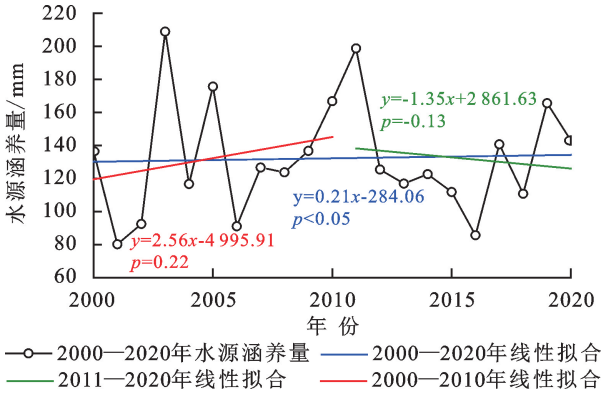

图 2 陕西省 2000—2020 年水源涵养量时间变化

Fig. 2 Temporal change of water conservation in Shaanxi province from 2000 to 2020

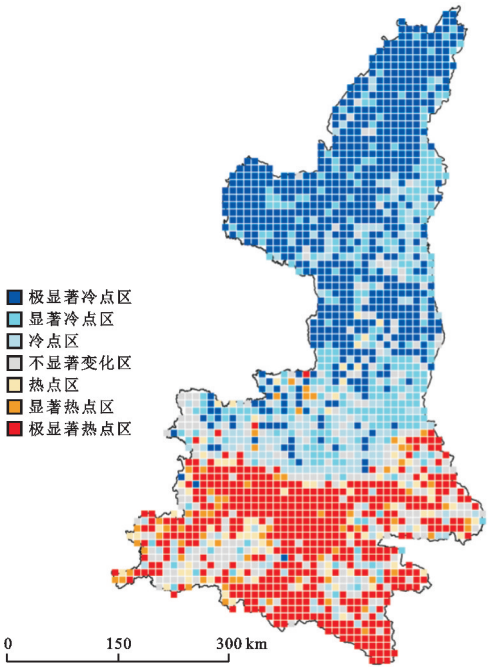

图 3 陕西省水源涵养量热点分布

Fig. 3 Distribution map of water conservation hotspots in Shaanxi province

2.1.3 不同植被类型 2000—2020 年年均水源涵养能力及水源涵养量分析 研究区主要植被类型为林地、耕地、草地、湿地、水域、建设用地和未利用地。将单位面积的水源涵养量定义为水源涵养能力。林地水源涵养能力最高（图 4），为 216.61 mm；水域次之，为 93.44 mm；耕地的水源涵养能力为 76.12 mm。林地生态系统单位降水的水源涵养能力最大，单位降水的水源涵养量为 0.28 mm，湿地的单位降水的水源涵养量为 0.14 mm，耕地的单位降水的水源涵养量为 0.12 mm，未利用地单位降水的水源涵养量最低，为 0.05 mm。

2.1.4 不同行政区 2000—2020 年年均水源涵养量分析 图 5 为陕西省行政区的水源涵养量图，水源涵养量为安康市（308.96 mm）＞汉中市（251.03 mm）＞

商洛市(241.90 mm)＞西安市(159.43 mm)＞宝鸡市(154.73 mm)＞咸阳市(71.53 mm)＞渭南市(68.61 mm)＞铜川市(67.91 mm)＞延安市(33.77 mm)＞榆林市(18.94 mm)。由于降水等气候原因，陕西省降水南北差异较大，降水主要集中于陕南地区，增强陕南地区的水源涵养能力，陕南地区的水源涵养总量占全省水源涵养总量的 1/2 以上，其中，安康市、汉中市、商洛市、榆林市、延安市水源涵养总量分别为 72.78×10^8，67.93×10^8，47.39×10^8，8.13×10^8，12.52×10^8 m^3，水源涵养高值区集中于陕南地区，水源涵养低值区主要集中在陕北地区。

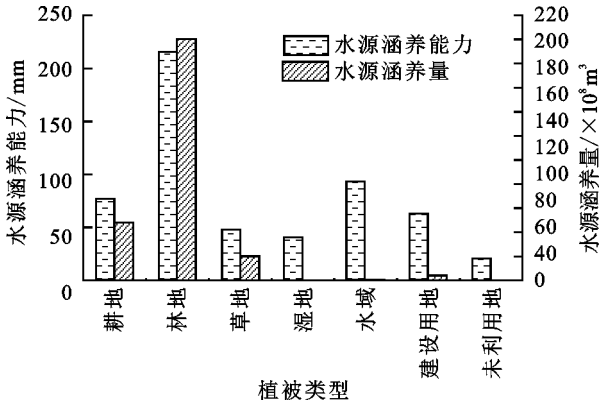

图 4　陕西省不同植被类型水源涵养能力及水源涵养量

Fig. 4　Water conservation capacity and water conservation amount of different vegetation types in Shaanxi province

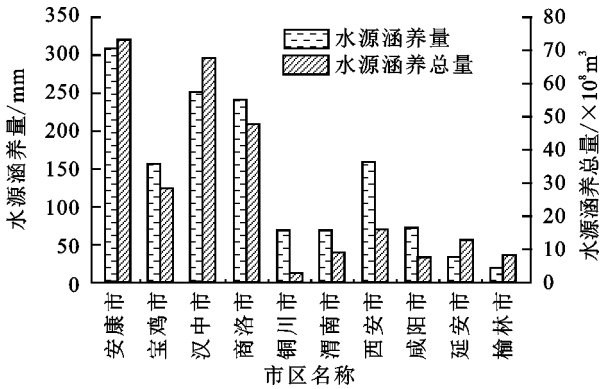

图 5　陕西省不同行政区水源涵养量及水源涵养总量

Fig. 5　Water conservation quantity and total water conservation quantity in different administrative regions of Shaanxi province

2.2　2030 年土地利用水源涵养量预测

从土地利用面积变化来看，以 2020 年为基准期，预测 2030 年土地利用类型，并根据土地类型计算出陕西省 2030 年的水源涵养总量，与 2020 年进行对比(表 2)，耕地、林地、草地仍是陕西省生态系统主要土地利用类型。建设用地和水域面积增加，耕地、林地、草地、湿地、未利用地面积减少。其中，建设用地相比于 2020 年扩张 1 945.07 km^2，增幅为 29.19%，水域面积增加 26.78 km^2，增幅为 3.22%。在减少的土地利用类型中，耕地、林地、草地、湿地、未利用地面积分别减少 780.74，252.32，860.94，31.87，45.96 km^2，相比于 2020 年降幅分别为 1.26%，0.27%，2.03%，21.12%，3.37%。

从水源涵养量变化来看，陕西省 2030 年水源涵养量为 285.16×10^8 m^3，比 2020 年减少 8.68×10^8 m^3，呈下降趋势，主要是建设用地扩张和林地、耕地、草地面积的减少，其中，林地水源涵养量最高，为 190.48×10^8 m^3，占 2030 年总水源涵养量的66.80%，其次是耕地和草地，水源涵养量分别为 65.24×10^8 和 17.51×10^8 m^3。相比于 2020 年，林地面积减少 252.32 km^2，而林地水源涵养总量则减少 17.61×10^8 m^3，由此得出，林地面积和陕西省水源涵养量呈正相关性。通过与陕西省 2020 年水源涵养空间分布图(图 6)可知，2030 年水源涵养空间分布特征同 2020 年相似，空间分布特征为水源涵养能力由北向南逐渐增加，高水源涵养区分布于陕南地区，低水源涵养区仍分布于陕北地区。

3　讨 论

相较于一些已有的水源涵养研究[19]，本研究在水源涵养分析的基础上，进一步预测土地利用变化下的水源涵养量。不同的土地利用方式改变地表和地下水系统的动态，其直接影响表现为通过改变土壤类型及质地，以及改变下垫面结构来影响水源涵养量[20]；间接影响表现为通过影响政策及社会经济因素对生态系统作用，进而对水源涵养量产生影响。土地利用对水源涵养及生态系统作用方式及影响途径涉及各方面，且作用方式及影响途径可相互结合进而对水源涵养产生影响。

本研究通过 InVEST 模型进行水源涵养量的计算时，产水量数据通过水资源公报进行逐一修正，从而提高模拟值和实际值的拟合度，水源涵养量是利用地形指数、流速系数、土壤饱和导水率对产水量数据进行修正计算的，土壤饱和导水率计算公式[21]经过逐个验证和比较，最终确定出相对符合本研究区的计算公式。采用 PLUS 模型的 Kappa 统计工具对模型预测的土地利用类型进行验证，Kappa 系数＞0.8，证明该模型可以用于土地利用类型预测。

水源涵养能力是生态系统可持续发展的重要指示工具[22]。秦岭陕西段是我国重要的水源地，分析该地区水源涵养能力及对未来水源涵养量做出预测对提高水资源承载力、维护生态系统稳定具有重要意义[23]。

表 2 陕西省不同土地利用类型及其水源涵养量

Table 2 Different types of land use and water conservation in Shaanxi province

土地类型	2020 年				2030 年			
	面积/km²	占比/%	水源涵养量/(×10⁸ m²)	占比/%	面积/km²	占比/%	水源涵养量/(×10⁸ m²)	占比/%
耕地	62 020.96	30.17	53.28	18.13	61 240.22	29.79	65.24	22.88
林地	92 115.62	44.81	208.09	70.81	91 863.30	44.69	190.48	66.80
草地	42 402.03	20.63	26.26	8.94	41 541.09	20.21	17.51	6.14
湿地	150.93	0.07	0.09	0.03	119.06	0.06	0.07	0.03
水域	832.71	0.41	0.88	0.30	859.48	0.42	1.11	0.39
建设用地	6 662.82	3.24	4.84	1.65	8 607.89	4.19	9.79	3.43
未利用地	1 364.93	0.66	0.40	0.14	1 318.97	0.64	0.96	0.34
合计	205 550.00	100.00	293.84	100.00	205 550.00	100.00	285.16	100.00

本研究中，水源涵养量空间分布上具有南多北少的特征，林地水源涵养量最大，与 WANG 等[24]研究结果相似。土地利用类型面积和水源涵养量呈正相关，林地面积减少导致 2030 年水源涵养量减少，建设用地面积增加导致水源涵养量的增加，与尚明宇等[25]研究结果一致。本研究为凸显土地利用变化对于水源涵养的影响，在进行水源涵养量的计算时，除土地利用外，其他数据均采用多年平均值进行代替，降水和蒸发数据消除年际变化对于水源涵养量的影响。本研究的不足为限制层深度、高程等数据对水源涵养量影响较小，因此，采用原始数据进行预测，水源涵养是多个因素综合作用的结果，预测数据过程中未能逐个进行分析，在未来研究中将继续深入对未来水源涵养能力的分析。

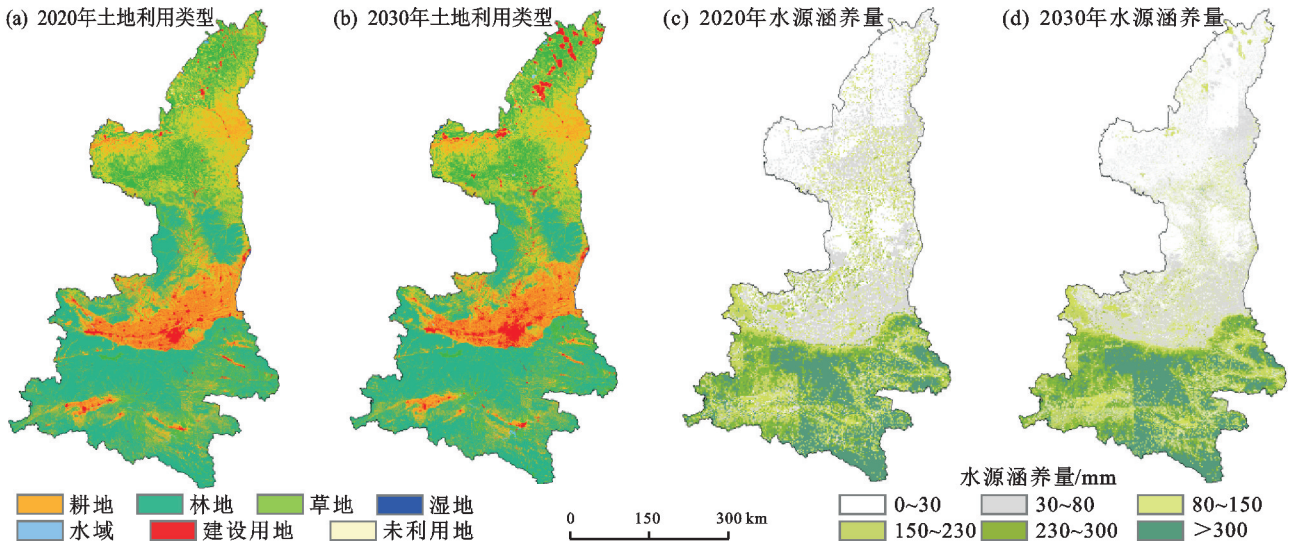

图 6 陕西省土地利用及水源涵养量

Fig. 6 Land use and water conservation in Shaanxi province

4 结 论

(1)从时间变化上来看，陕西省 2000—2020 年平均水源涵养量呈先增加后减少趋势，2003 年水源涵养量达到最大，为 208.87 mm。从空间变化特征来看，水源涵养量由北向南逐渐增加，高水源涵养区主要分布在以林地为主的陕南地区。

(2)从不同植被类型上来看，林地水源涵养能力最高，水域和耕地次之。

(3)从不同行政区划来看，安康市(72.78×10⁸ m³)、汉中市(67.93×10⁸ m³)、商洛市(47.39×10⁸ m³)陕南地区城市水源涵养总量较高。陕西省 2030 年水源涵养量为 285.16×10⁸ m³，相比于 2020 年呈下降趋势，其中，林地水源涵养量最高。2030 年水源涵养空间分布特征与 2020 年相似，呈由北向南逐渐增加趋势。

参考文献：

[1] CHEN Q R, XU X, WU M Y, et al. Assessing the water conservation function based on the InVEST model: Taking Poyang Lake region as an example[J]. Land, 2022, 11(12): e2228.

[2] MA P, LYU S H, DIAO Z Y, et al. How does the water conservation function of Hulunbuir forest—steppe

ecotone respond to climate change and land use change?[J].Forests,2022,13(12):e2039.

[3] 张福平,李肖娟,冯起,等.基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量[J].中国沙漠,2018,38(6):1321-1329.
ZHANG F P, LI X J, FENG Q, et al. Spatial and temporal variation of water conservation in the upper reaches of Heihe River Basin based on InVEST model[J]. Journal of Desert Research,2018,38(6):1321-1329.

[4] WANG H, ZHANG C, LI L, et al. Delimitating the ecological spaces for water conservation services in Jilin Province of China[J].Land,2021,10(10):e1029.

[5] WEI X T, EBOY O V, CAO G C, et al. Spatio-temporal variation of water conservation and its impact factors on the southern slope of Qilian Mountains[J].Regional Sustainability,2023,4(1):54-67.

[6] 刘景红,郑晓,樊俊美,等.基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估[J].应用生态学报,2021,32(11):3905-3912.
LIU J H, ZHENG X, FAN J M, et al. Evaluation of the value of water retention service in the middle and upper reaches of Hunhe River based on SWAT model[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(11):3905-3912.

[7] 张鑫建,龙胤慧,廖梓龙,等.阴山北麓塔布河流域产水量时空变化规律研究[J].节水灌溉,2023(10):98-107.
ZHANG X J, LONG Y H, LIAO Z L, et al. Temporal and spatial variation of water yield in the Tabu River Basin of the Northern Yinshan Mountain[J].Water Saving Irrigation,2023(10):98-107.

[8] 张晓娟,周启刚,王兆林,等.基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J].农业工程学报,2017,33(19):268-277.
ZHANG X J, ZHOU Q G, WANG Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE-CA-Markov[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(19):268-277.

[9] 时宇,李明阳,杨玉锋,等.基于 CLUE-S 模型的城市森林公园土地利用情景规划方法研究[J].西北林学院学报,2014,29(5):163-168.
SHI Y, LI M Y, YANG Y F, et al. CLUE-S based scenario planning of land use in urban forest park[J].Journal of Northwest Forestry University,2014,29(5):163-168.

[10] 韩楚翘,郑江华,王哲,等.基于 PLUS-InVEST 模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J/OL].干旱区地理,1-15[2024-01-08]http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20230918.1917.001.html.
HANG Q C, ZHENG J H, WANG Z, et al. Spatio-temporal variation and multi-scenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in Turpan Hami Basin based on PLUS-InVEST model[J].Arid Land Geography, 1-15[2024-01-08]http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20230918.1917.001.html.

[11] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J].水土保持学报,2020,34(4):217-223.
CAO Y L, SONG J X, LI M Y, et al. Evaluation of ecosystem water conservation function of Shaanxi province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(4):217-223.

[12] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(8):2731-2739.

[13] 伍堂银,周忠发,张露,等.基于 InVEST 模型的南北盘江流域产水量时空变化研究[J].水土保持通报,2023,43(3):129-138.
WU T Y, ZHOU Z F, ZHANG L, et al. Spatial-temporal variation of water yield in Nanbei panjiang river basin based on InVEST model[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(3):129-138.

[14] 刘娇,郎学东,苏建荣,等.基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J].生态学报,2021,41(20):8099-8111.
LIU J, LANG X D, SU J R, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):8099-8111.

[15] 孙晓晨,焦菊英,王红雷,等.河湟谷地 1980—2020 年土地利用变化及其冷热点分布[J].水土保持通报,2022,42(1):327-334.
SUN X C, JIAO J Y, WANG H L, et al. Land use changes and cold-hot spot distribution in Hehuang Valley from 1980 to 2020[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(1):327-334.

[16] 胡佶熹,勒先文,王卫林,等.基于 PLUS-InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测[J/OL].环境科学,1-17.[2024-01-08]https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202305239.
HU J X, LE X W, WANG W L, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi province based on PLUS－InVEST

model[J].Environmental Science,2023:1-17.[2024-01-08]https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202305239.

[17] 李阜鹏,韩惠,杨树文.甘肃省 2000—2020 年土地利用变化分析及基于 PLUS 的生态空间多情景模拟[J].科学技术与工程,2023,23(15):6316-6326.
LI F P, HAN H, YANG S W. Analysis of land use change in Gansu province from 2000 to 2020 and multi-scenario simulation of Gansu's ecological space based on PLUS[J].Science Technology and Engineering,2023,23(15):6316-6326.

[18] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
HU F, ZHANG Y, GUO Y, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1125-1136.

[19] 宋茜,何永涛,黄凤荣,等.2000—2020 年藏北高寒草地水源涵养功能变化及影响因素分析(英文)[J].Journal of Resources and Ecology,2023,14(03):493-501.
SONG Q, HE Y T, HUANG F R, et al. Variation of water conservation function and its influencing factors of alpine grasslands in Northern Tibet from 2000 to 2020[J].Journal of Resources and Ecology,2023,14(3):493-501.

[20] 文志,赵赫,刘磊,等.土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4025-4033.
WEN Z, ZHAO H, LIU L, et al. Effects of land use changes on soil water conservation in Hainan Island, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(12):4025-4033.

[21] DAI Y J, SHANGGUAN W, DUAN Q Y, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J].Journal of Hydrometeorology,2013,14(3):869-887.

[22] 高红凯,刘俊国,高光耀,等.水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析[J].地理学报,2023,78(1):139-148.
GAO H K, LIU J G, GAO G Y, et al. Ecological and hydrological perspectives of the water retention concept[J].Acta Geographica Sinica,2023,78(1):139-148.

[23] 周冰玉,李志威,田世民,等.黄河源区水源涵养能力研究综述[J].水利水电科技进展,2022,42(4):87-93.
ZHOU B Y, LI Z W, TIAN S M, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):87-93.

[24] WANG T F, GONG Z W. Evaluation and analysis of water conservation function of ecosystem in Shaanxi Province in China based on "Grain for Green" Projects[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29(55):83878-83896.

[25] 尚明宇,王富强,马尚钰.郑州市土地利用/覆被变化模拟预测及其水源涵养量计算评估[J].水利水电技术(中英文),2023,54(1):75-86.
SHANG M Y, WANG F Q, MA S Y, et al. Prediction of land use/cover change and evaluation of water conservation function in Zhengzhou City[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(1):75-86.

(上接第 186 页)

[23] HOPKINS A J, SNYDER N P. Performance evaluation of three DEM-based fluvial terrace mapping methods[J].Earth Surface Processes and Landforms,2016,41(8):1144-1152.

[24] DAI W, NA J M, HUANG N, et al. Integrated edge detection and terrain analysis for agricultural terrace delineation from remote sensing images[J].International Journal of Geographical Information Science,2020,34(3):484-503.

[25] 吴宗洋,蔡卓雅,郭英,等.黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(6):917-927.
WU Z Y, CAI Z Y, GUO Y, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis of multi-source remote sensing land cover data in the Yellow River Basin[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023,31(6):917-927.