

饮用水源地产水量时空变化及其影响因子

——以云龙水库为例

刘安友¹, 邹进¹, 刘磊², 周齐彬¹, 李阳¹, 容祎¹, 何潇¹

(1.昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2.云南省水文水资源局 曲靖分局, 云南 曲靖 655000)

摘要: [目的] 探究昆明市饮用水源地之一的云龙水库流域 2001—2020 年产水量时空格局变化及其影响因子, 为水源地产水量服务功能的可持续发展、生态补偿机制和生态保护政策的制定提供科学依据。[方法] 基于 InVEST 模型与 ArcGIS 空间地理分析工具分析产水量时空变化, 采用多情景分析与差值比较法对影响因子进行比较分析。[结果] ① 云龙水库流域产水量呈现季节性分布特点, 多集中于夏季, 2001—2020 年产水量整体呈先下降后上升趋势, 3 期单位面积产水量均值分别为 495, 278, 364 mm。② 在空间格局分布上, 产水量由西南向东北逐步增加, 高值区位于东北部, 低值区位于中部。③ 2001—2020 年土地利用变化、降水量、潜在蒸散量对云龙水库流域产水量变化的贡献度依次为 1.93%, 85.66%, 12.41%。[结论] 气候因子是影响云龙水库流域产水量变化的主导因子, 土地利用类型变化最小, 在土地利用类型中林地年产量最高。未来在云龙水库流域应减少人类生产生活中向大气释放的废热, 加强水源涵养林的建设与保护, 降低人类活动改变下垫面性质对气候产生的消极影响。

关键词: 水源地; 产水量; 土地利用; 云龙水库; InVEST 模型; 影响因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0385-11

中图分类号: K903

文献参数: 刘安友, 邹进, 刘磊, 等. 饮用水源地产水量时空变化及其影响因子[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 385-395. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.044; Liu Anyou, Zou Jin, Liu Lei, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of water yield in drinking water sources [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 385-395.

Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of Water Yield in Drinking Water Sources —A Case Study at Yunlong Reservoir Basin

Liu Anyou¹, Zou Jin¹, Liu Lei², Zhou Qibin¹, Li Yang¹, Rong Yi¹, He Xiao¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of

Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Qujing Branch of

Yunnan Provincial Hydrological and Water Resources Bureau, Qujing, Yunnan 655000, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal distribution of water yield at Yunlong Reservoir basin (one of the sources of drinking water in Kunming) from 2001 to 2020 was studied in order to provide a scientific basis for the sustainable development of a water yield service function, and for constructing an ecological compensation mechanism and ecological protection policies. [Methods] We used the InVEST model and the ArcGIS spatial geographic analysis tool to determine the spatial and temporal changes of water yield. The factors influencing these changes were compared and analyzed by multi-scenario analysis and the difference comparison method. [Results] ① The water yield of Yunlong Reservoir basin showed seasonal distribution characteristics, mostly concentrated in summer. From 2001 to 2020, the water yield of Yunlong Reservoir basin initially decreased and then increased. The average water yield per unit area in the three study phases were 495 mm, 278 mm, and 364 mm, respectively. ② Water production gradually increased spatially from southwest to northeast,

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2022-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“质量能构架下水资源承载力演变的动态机理及其可持续性研究”(41061053)

第一作者: 刘安友(1997—), 男(汉族), 云南省砚山县人, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统。Email: liuay99@163.com。

通信作者: 邹进(1973—), 女(汉族), 贵州省安顺市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源系统分析方面的研究。Email: Jone_zou@163.com。

with high values located in the northeast and low values in the middle. ③ The contribution rates of land use change, precipitation, and potential evapotranspiration to water yield change at Yunlong Reservoir basin from 2001 to 2020 were 1.93%, 85.66%, and 12.41%, respectively. [Conclusion] Climate was the dominant factor affecting water yield changes at Yunlong Reservoir basin, and changes in land use type had the smallest impact on water yield. The annual water yield of forest land was the highest among the land use types. In the future, efforts should be made at Yunlong Reservoir basin to reduce the waste heat released to the atmosphere by human production activities and life, to strengthen the construction and protection of water conservation forests, and to reduce the negative impacts of human activities on climate which are the results of changing the underlying surface properties.

Keywords: water source; water production; land use; Yunlong Reservoir; InVEST model; influencing factors

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1]。人类生活生产的一切物质来源均源于地球生态系统,生态系统服务功能会因人类活动的影响而改变,但人类活动始终无法替代生态系统服务功能^[2]。水资源是支撑整个地球生态系统的基础,淡水生态系统不仅为人类提供饮用、灌溉及工业用水等原料,还具有维持自然生态系统物种多样性、区域生态环境、物质交流过程等功能^[3]。其中,产水服务是最重要的生态系统服务功能之一^[4],它对人类生活生产,调节区域气候和水文循环发挥着关键作用。流域产水服务的时空格局变化及影响因素研究近年来已成为水文学、生态学、地理学等诸多交叉学科科学家的研究热点,产水服务评估的一些传统方法主要基于水量平衡法、土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、年径流量法、多因子回归法等方法^[5-6],这些方法多用于小流域,结果受流域内实际观测条件等客观因素限制,对于大尺度流域时空变化分析适用性较差。近年来,伴随着 3S 技术发展,越来越多可用于产水服务评估的水文模型被开发利用,如 InVEST, ARIES, MIMES, SWAT, MIKE SHE, TOPMODEL, EPM 等模型^[7-8], ARIES, MIMES, EPM 模型基于案例构建,适用性差,精度低,开发不完全; MIKE SHE, SWAT 等模型所需数据较多且获取难度大; InVEST 模型由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发,具有数据获取简易、精度高、结果空间可视化、区域应用相对成熟等优点,被广大学者运用于全球各区域生态系统服务功能评估研究。

Bejagam 等^[9]针对印度通加巴德拉河流域利用 InVEST 模型产水量模块通过设置不同情景,分析水电站发电量与产水量之间的变化关系。Pan Tao 等^[10]人运用 InVEST 模型分析中国最大的水源供应与保护生态功能区三江源区 25 a 间水源供应服务时空变化,认为气候和土地利用变化导致生态系统退化

和地表变化,从而导致了三江源区水源供应下降。Yang Dong, 郭洪伟, Yang Jie 等^[11-13]人基于 InVEST 模型分别对中国湘江、南四湖、黄河等流域的产水量作出了动态评估分析,验证了模型在中国的适用性,对相关影响因子作出评价,结论表明区域较大时气候的变化对于水源涵养量的影响要高于土地覆被改变的影响,研究区较小时结论正好相反,这一结论为人们在制定生态保护区政策时提供了科学依据,对整个流域生态环境、维护生态平衡具有重要意义。目前,大多数学者运用 InVEST 模型对产水量的时空变化及影响因素研究多用于大尺度空间流域,多以城市、省份、大流域等为研究对象,对于中国西南地区具有高海拔、喀斯特地貌等显著性区域特征的小尺度流域研究较少。云龙水库作为昆明市主要的饮用水供给对象,自 2004 年建成下闸蓄水,2007 年便开始为昆明市饮水供水,2009 年 9 月为保障昆明市城市供水安全,昆明市委、市政府启动云龙水库一级保护区水库核心区移民搬迁工作至 2013 年 1 月全部搬迁完毕。20 a 间云龙水库流域土地利用变化较大,故选择 2001, 2010 和 2020 年 3 期作为研究期。为保证云龙水库对昆明市饮用水的安全可持续利用保障,对云龙水库流域产水服务功能时空变化规律及影响因素的研究具有重要科学意义。因此,本文基于 InVEST 模型探究云龙水库流域作为饮用水水源地保护区前后产水量的时空变化,并将多情景分析与差值比较法相结合,对影响水源地产水量变化因子进行分析,评估分析云龙水库流域的产水服务功能变化规律。研究结果可为水源地生态环境可持续发展,保护区划分、生态补偿机制和生态保护等政策的合理制定提供科学依据。

1 研究区概况及数据方法

1.1 研究区概况

云龙水库位于云南省昆明市北部,流域位于昆明市禄劝县和楚雄州武定县境内(102° 22' 30—

102°32'18"E, 25°5'16"—25°58'6"N), 最高点位于北部, 海拔 3 113 m, 最低点位于水库大坝, 海拔 2 048 m, 该流域总体地势由西南向东北逐渐升高, 流域控制面积为 740.29 km², 是昆明市最大的集中式饮用水源地。云龙水库流域属于中亚热带季风气候, 多年平均气温 10.2~13.80 °C, 多年平均降水量 1 007~1 200 mm, 气候干湿季节分明, 夏秋多雨, 冬春干旱; 植被覆盖较高, 达到 69.2%, 多为针阔混交林、灌木丛和草本植物; 区内以岩溶构造形成的峡谷地貌和山地构造侵蚀形成的河谷地貌为主, 河谷多呈 V 形, 间有岩溶漏斗、岩溶洼地; 本研究时间年份选取为 2001、2010 和 2020 年 3 期, 年降水量分别为 1 034、800 和 900 mm, 以 2001 年为基准年、2001 年降水量为 1 034 mm 属于偏丰年。

1.2 产水模型

本研究采用 InVEST 模型产水量模块对云龙水库流域 2001、2010 和 2020 年产水量时空变化进行评估分析。该模型产水量模块基于水量平衡原理, 根据 Budyko 水热耦合平衡假设^[14], 通过输入年降水量、潜在蒸散发量和土地利用/覆被等数据, 采用研究区栅格尺度上的降水量减去实际蒸散发的水量得到每个栅格单元的年均产水量, 进而得到整个流域内的产水量, 同理可计算分析月产水量。具体计算方法^[15]为:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_x 表示栅格 x 的产水量; AET_x 表示栅格 x 的年实际蒸散发量; P_x 表示栅格 x 的年均降水量。其中 AET_x/P_x 为土地利用/覆被类型的植被蒸散发量, 计算方法^[16-17]为:

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_x}{1 + \omega_x R_x + 1/R_x} \quad (2)$$

$$R_x = \frac{K_c \times ET_{0x}}{P_x} \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: R_x 为 Budyko 干燥指数, 通过公式(3)年均潜在蒸散发与年降水量计算获得; K_c 为植被蒸散系数; ET_{0x} 栅格 x 的年均潜在蒸散发; ω_x 是土壤气候参数, 通过公式(4)土壤有效含水量与年降水量计算得到; Z 为 Zhang 系数^[18]; AWC_x 为土壤有效含水量。

1.3 数据来源及处理方法

InVEST 模型 3.9.2 版本产水量模块所必需驱动的驱动数据包括研究区 DEM 图、降水量、蒸散量、LULC 值、流域、植物可利用含水量、生物物理参数表等。

1.3.1 云龙水库流域矢量数据 通过地理空间数据云(www.gscloud.cn)得到研究区空间分辨率为 30 m DEM 数据, 利用 ArcGIS 填洼、计算流向、流量、矢量化、裁剪等工具提取出云龙水库流域及水系等矢量数据。

1.3.2 气象数据 年降雨量数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>), 中国 2001—2020 年降水量数据空间分辨率为 1 km。月降雨量、潜在蒸散发数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>), 中国 1901—2021 年逐月降雨量、1990—2020 年逐月潜在蒸散发数据空间分辨率均为 1 km。通过 ArcGIS 创建栅格图层、计算、裁剪、掩膜提取等工具处理分别得到研究区月、年降雨量图和月、年潜在蒸散发图。

1.3.3 土地利用数据 土地利用数据通过中国科学院资源环境数据中心下载得到初始空间分辨率为 30 m 的云南 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用类型栅格数据, 2000—2001 年云龙水库流域土地利用基本未变, 故 2001 年土地利用数据以 2000 年代替, 通过投影、裁剪、重分类等操作处理得到研究区空间分辨率为 30 m 的 2001、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据, 依据中国土地利用分类体系一级分类标准将云龙水库流域土地利用类型划分为耕地、林地、草地、城乡建设用地、水域 5 类。

1.3.4 土壤数据 土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据和中国土壤水文数据集, 植物可利用水量为凋萎系数与田间持水量之差, 本研究利用周文佐提出的计算公式^[19]如下:

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times SAN - 0.003 \times (SAN)^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times (SIL)^2 - 0.738 \times CLA + 0.007 \times (CLA)^2 - 2.668 \times OM + 0.501 \times (OM)^2 \quad (5)$$

式中: SAN 为土壤沙粒含量(%); SIL 为土壤粉粒含量(%); CLA 为土壤黏粒含量(%); OM 为土壤有机质含量(%)。通过栅格投影、裁剪、计算等处理得到研究区植物可利用水量数据。

1.3.5 根系限制层深度 根系限制层深度是指植物根系在土壤中能够生长的最大深度^[15], 即未固结表面材料(如土壤或其他风化层)到固结实心岩石的基岩深度, 数据获取来源于 Yan Fapeng 等人^[20]空间分辨率为 100 m 的中国深度至基岩地图, 经过栅格投影、计算、裁剪等处理得到研究区植被根系限制层深度数。

1.3.6 其他参数及模型校验 生物物理系数与土地类型的分类相关,本研究参考 InVEST 模型使用手册结合云南省相关学者^[21-25]研究文献进行确定。 Z 为经验常数,取值在 1~30 之间,根据云龙水库水文站已有实测年径流量与模拟结果进行多次率定分析,确定当 Z 值为 30 时,实测值与模拟值之间的相对误差在 10% 以内(如表 1 所示),说明模拟精度较高,结果可信,故本次研究采用 Z 常数值为 30 时的 InVEST 模型对云龙水库流域产水量服务功能进行评估分析。

表 1 云龙水库流域 InVEST 模型模拟结果校验
Table 1 Verification of InVEST model simulation results at Yunlong Reservoir basin

年份	模拟值/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	实测值/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	相对误差/ %
2005	25 961.69	25 613.64	1.36
2006	19 886.18	19 637.59	1.27
2007	35 465.93	35 854.38	1.08
2008	31 095.61	30 096.68	3.32
2009	18 400.87	18 257.83	0.78
2010	20 663.70	19 283.19	7.16
2011	13 848.94	13 952.69	0.74
2012	15 455.72	16 138.93	4.23
2013	18 990.52	17 797.66	6.70
2014	19 872.43	18 750.21	5.99
2015	21 826.96	21 039.72	3.74
多年平均	241 468.55	236 422.52	2.13

1.4 多情景分析

本研究设置多种情景并结合差值比较法^[22]进行分析探究不同影响因子对云龙水库流域产水量的影响程度,利用不同因子变化对产水量的贡献度来判别。贡献度的量化通过设置多情景变化实现,具体计算方法为:

$$W_L = \frac{\Delta L}{\Delta L + \Delta R + \Delta P} \times 100\% \quad (6)$$

$$W_R = \frac{\Delta R}{\Delta L + \Delta R + \Delta P} \times 100\% \quad (7)$$

$$W_P = \frac{\Delta P}{\Delta L + \Delta R + \Delta P} \times 100\% \quad (8)$$

式中: W_L, W_R, W_P 分别表示土地利用、降水量、潜在蒸散发量变化对产水量变化的贡献度; $\Delta L, \Delta R, \Delta P$ 分别表示各情景下产水变化量。

1.4.1 土地利用变化情景 云龙水库于 2004 年建成投入使用下闸蓄水,2009—2013 年进行了水源保护区移民搬迁工程,20 a 间云龙水库流域土地利用变

化较大;为探究土地利用对研究区产水量变化影响,在已经率定好模型的基础上,以 2001 年降雨量、潜在蒸发量及其他参数为基准不变,输入 2001 年水库未建设、2010 年水库已建成并开始移民搬迁工作、2020 年移民搬迁工作完成 3 期不同的土地利用数据,以此设定 2001(L_1),2010(L_2),2020(L_3) 3 类情景分析土地利用变化对产水量的影响。

1.4.2 年降雨量变化情景 基于率定好的模型,以 2001 年的土地利用、潜在蒸发量及其他参数为基准不变,输入 2001,2010 和 2020 年 3 个时期不同降雨量数据,设定 2001(R_1),2010(R_2),2020(R_3) 3 类情景分析降雨量变化对研究区产水量的影响。

1.4.3 年潜在蒸散发量变化情景 基于率定好的模型,以 2001 年的土地利用、降雨量及其他参数为基准不变,输入 2001,2010 和 2020 年 3 个时期潜在蒸散发量数据,设定 2001(P_1),2010(P_2),2020(P_3) 3 类情景分析潜在蒸散发量变化对研究区产水量的影响。

1.5 土地利用转移矩阵

土地利用动态度和土地利用转移矩阵能够清晰反映研究区内土地利用类型的动态变化信息。土地利用动态度是用来反映一定时间内土地利用的变化速度和变幅,表明人类活动在某一时间段内对单一土地利用类型的影响,其数学模型^[23]为:

$$M_i = \frac{A_{i2} - A_{i1}}{A_{i1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中: M_i 为 t_1 到 t_2 时段内 i 类土地利用类型动态度; A_{i1}, A_{i2} 分别表示 t_1, t_2 时间 i 类土地利用类型面积。

土地利用转移矩阵可以对土地变化量进行定量分析也可以分析变化的方向,其数学模型为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: A_{ij} 为研究期前一时段和后一时段的土地利用状态; n 为土地利用的类型数量。

2 结果与分析

2.1 产水量时空分布

从月时间尺度分析,由图 1 知云龙水库流域在 2001,2010 和 2020 年各年份内产水量均呈现季节性分布,产水量随着云龙水库流域雨季来临而增加,高值区多集中于夏季,其中 2001,2010 和 2020 年各月中产水量体积最高值分别出现在 6 月 $9.32 \times 10^7 \text{ m}^3$, 6 月 $5.02 \times 10^7 \text{ m}^3$, 7 月 $8.38 \times 10^7 \text{ m}^3$,随着雨季的过去,流域内 11 月至次年 4 月间产水量急剧减少甚至

个别月份产水量为 0。从年时间尺度分析, 2001, 2010 和 2020 年 3 期云龙水库流域单位面积平均产水量分别为 495, 278 和 364 mm, 2001, 2010 和 2020 年云龙水库流域年产水量体积分别为 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.07 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中 2001 年产水量体积最高, 2010 年与之相比减少 $1.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2020 年减少 $9.76 \times 10^7 \text{ m}^3$; 2010 年产水量体积最低, 2020 年相比增加 $6.47 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

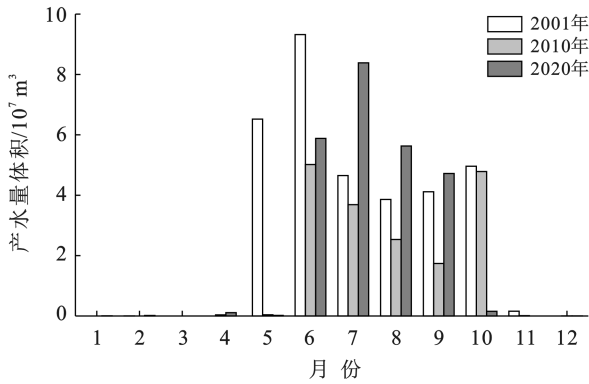


图 1 云龙水库产流域水量体积月份分布

Fig.1 Monthly distribution of water yield volume at Yunlong Reservoir basin

图 2 展示了 2001, 2010 和 2020 年实际情景下产水量空间格局分布, 总体上看, 云龙水库流域不同年

份产水量空间格局分布呈现一致性, 由西南向东北逐渐增加, 中部偏低, 东北部偏高。研究区内产水量变化与降雨量变化表现出一致性, 与潜在蒸散量变化趋势呈负相关。产水量空间格局分布情况与土地利用类型呈现密切相关性, 研究区东北部和西北部区域降雨量偏高、蒸发量偏低, 基于水量平衡原理, 这部分区域产水量为整个研究区的高值区, 而低值区则位于蒸发量较大的水域部分。2010 年云南经历了百年一遇旱灾, 产水量与气候因子密切相关, 故而云龙水库流域产水量最低时期出现在 2010 年。

图 3 为不同时期研究区年产水量变化空间分布图。由图 3 可知, 2001—2020 年期间产水量呈现先减少后增加的趋势; 其中 2001—2010 年产水量下降幅度最大, 水域附近下降量较之其他区域偏小。由 2001, 2010 和 2020 年 3 期的土地利用类型栅格地图计算得到各类土地利用面积, 通过 ArcGIS 分区统计分析计算得到相应地类产水量如表 2 所示。由表 2 可知, 不同时期林地的年产水量均为最高, 最少的为城乡用地, 主要是因为研究区内林地面积比例最大; 由单位面积产水量可以看出云龙水库流域 3 个阶段土地利用类型产水能力大小排序均为: 城乡用地 > 草地 > 耕地 > 林地 > 水域, 导致产水能力存在此差异的原因应该是不同的土地利用类型具有不同的蒸散系数、土壤含水量和下渗量等。

表 2 云龙水库流域不同土地利用类型单位面积产水量

Table 2 Water yield of different land use types at Yunlong Reservoir basin

土地利用类型	单位面积产水量		
	2001 年	2010 年	2020 年
耕地	11 656.93(62.35)	6 690.52(36.18)	8 484.53(47.11)
林地	21 340.18(49.35)	11 088.99(25.83)	15 148.79(35.28)
草地	6 342.66(63.66)	3 899.74(37.24)	5 022.66(48.17)
水域	638.97(30.90)	283.34(13.76)	407.90(19.71)
城乡用地	49.76(78.99)	39.76(52.31)	376.53(63.93)
合计	40 028.500(54.07)	22 002.34(29.72)	29 440.415(39.77)

注: 括号外数据为该类土地利用类型年产水量(10^4 mm), 括号内数值为该类土地利用类型单位面积产水量(10^4 mm/km^2)。

2.2 不同土地利用情景(L₁, L₂, L₃)下产水量模拟

设定 2001 年水库未建设(L₁), 2010 年水库建成开始移民搬迁工作(L₂), 2020 年移民搬迁工作完成时(L₃)3 期具有代表性的土地利用情景, 根据中国土地利用分类体系一级分类标准将云龙水库流域土地利用类型分为 5 类如图 4 所示。

由图 4 分析可知, 林地是研究区最主要的土地利用类型, 主要分布于水源保护区附近, 其次分别为耕地、草地、水域、城乡用地。图 5 为云龙水库流域不同土地利用情景下年产水量变化图, 年产水量大小根据

土地利用类型划分由大到小均表现为: 林地 > 耕地 > 草地 > 水域 > 城乡用地, 其中年产水量变化与林地、耕地、草地、水域面积变化表现出一致性, 城乡用地面积变化与之相反。根据图 4 中土地利用类型与产水量空间格局分析得出, 产水量高值区土地利用为城乡用地, 城乡用地植物覆被较少, 相对蒸散发量随之减少, 且下垫面为不透水层, 导致降水下渗进入地下的量减少, 从而引起城乡用地产水量增加; 相反, 产水量低值区土地类型为水域, 水域相对蒸散发量最大, 产水量降低。

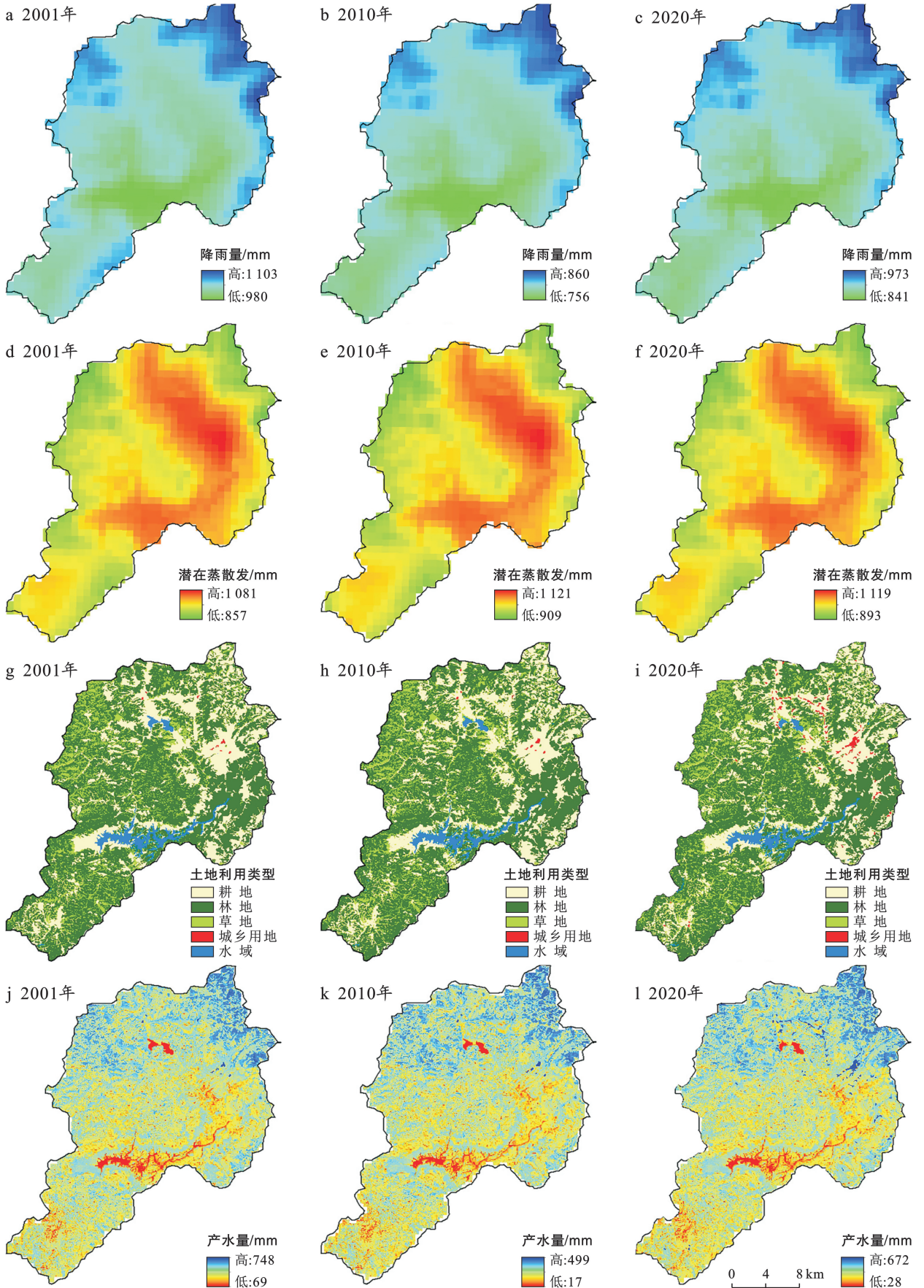


图2 云龙水库流域不同时期年降水量、年潜在蒸散发及产水量空间格局

Fig.2 Spatial pattern of annual precipitation, annual potential evapotranspiration and water yield in different periods at Yunlong Reservoir basin

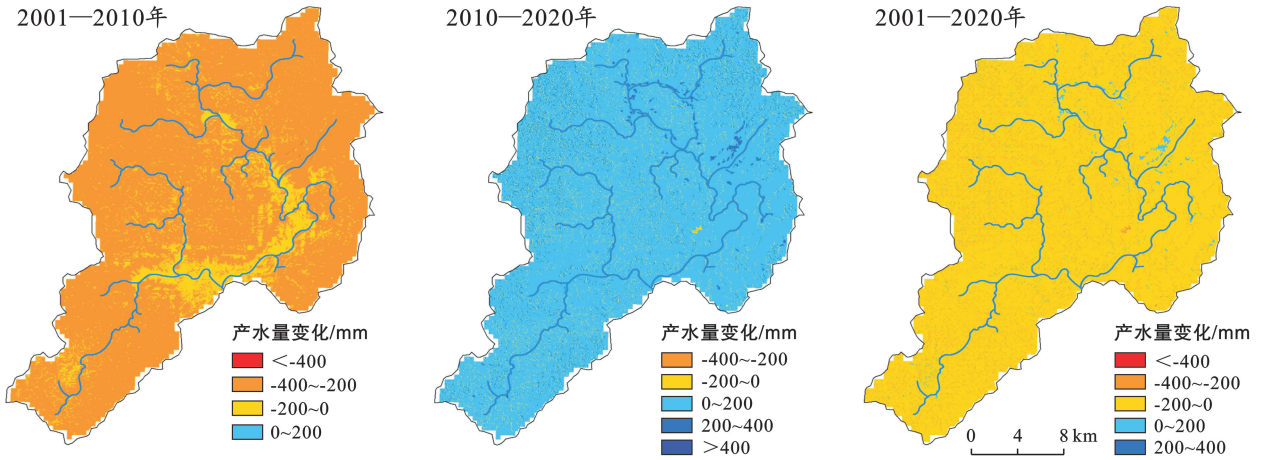


图 3 云龙水库流域不同时期年产水量变化空间格局

Fig.3 Spatial pattern of annual water yield change at Yunlong Reservoir basin during different periods

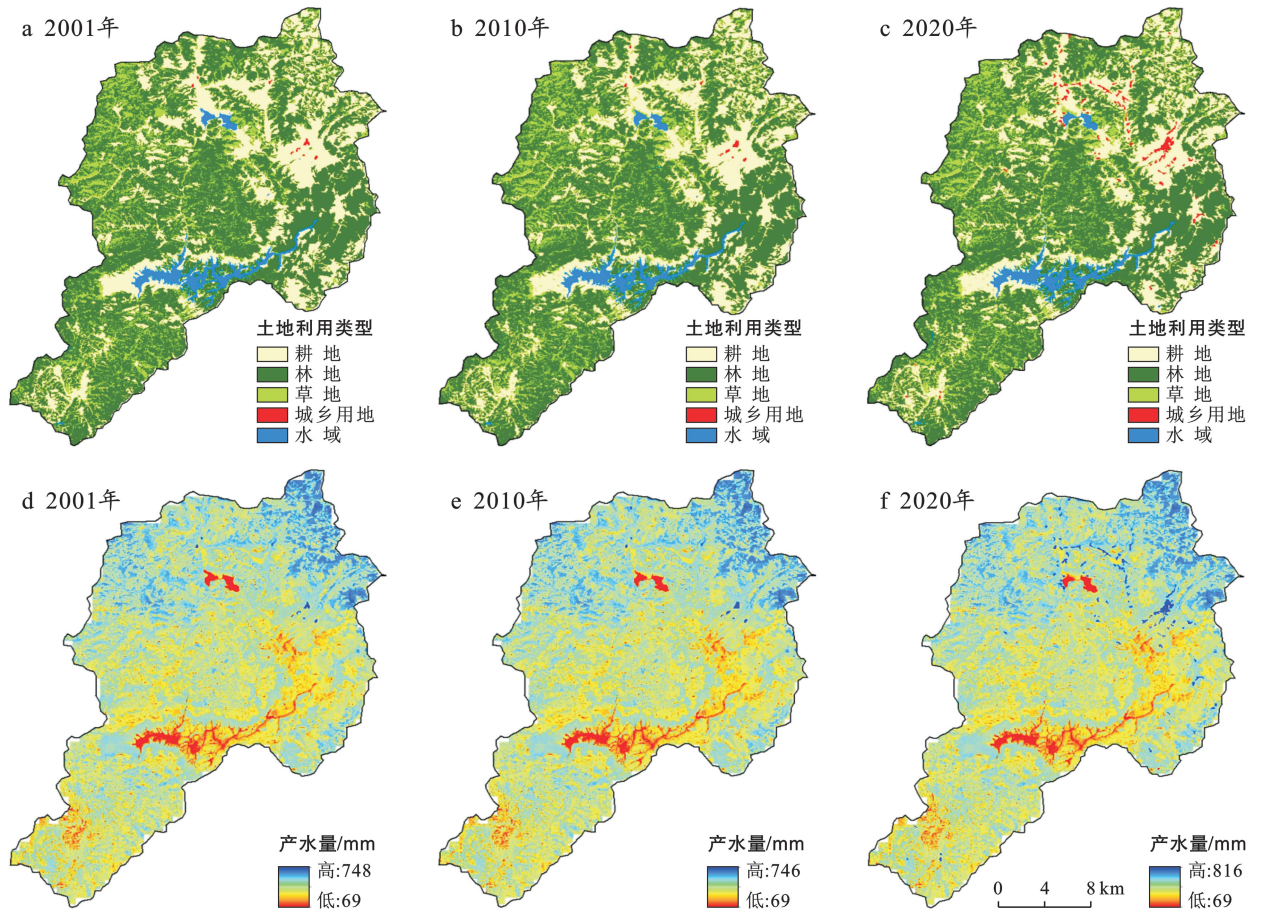


图 4 云龙水库流域不同土地利用情景下产水量空间格局

Fig.4 Spatial pattern of water yields under different land use scenarios at Yunlong Reservoir basin

经过统计分析得到 2001 年(L_1), 2010 年(L_2) 和 2020 年(L_3) 3 期土地利用类型面积变化情况如表 3—4 所示。林地和耕地是研究区内最主要的两类用地类型, 2020 年林地和耕地的面积占比分别为 57.99% 和 24.33%, 林地具有减少地表径流, 防治水土流失, 净化水体、改善水质等优点, 云龙水库作为昆

明市主要饮用水水源地, 林地对流域内的水源涵养、水质净化等具有重大意义^[24]。2001—2020 年林地与耕地面积减少, 水域面积基本未变, 草地与城乡用地面积增加, 城乡用地的增加表明水源保护区内移民搬迁工作的顺利进行以及流域内城镇化水平的不断提高。

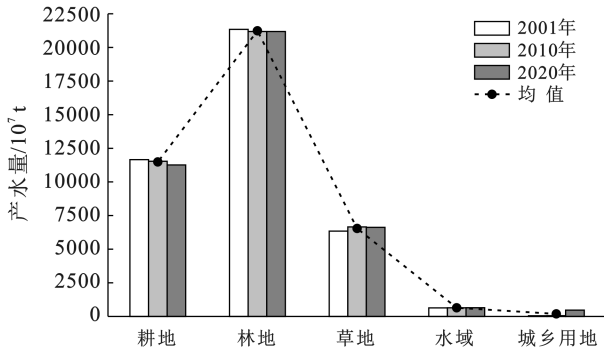
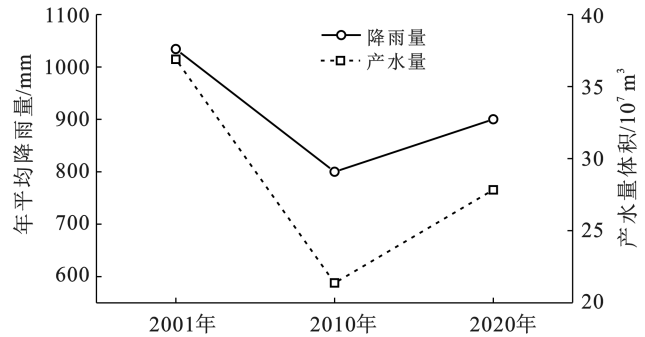
表 3 云龙水库流域不同时期土地利用类型(L_1, L_2, L_3)变化Table 3 Changes of land use types (L_1, L_2, L_3) in different periods at Yunlong Reservoir basin

土地利用类型	2001年(L_1)		2010年(L_2)		2020年(L_3)		2001—2010年 变化面积/ km^2	2010—2020年 变化面积/ km^2	2001—2020年 变化面积/ km^2
	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%			
耕地	186.95	25.25	184.90	24.98	180.11	24.33	-2.05	-4.79	-6.84
林地	432.39	58.41	429.32	57.99	429.33	57.99	-3.08	0.01	-3.06
草地	99.64	13.46	104.73	14.15	104.27	14.09	5.10	-0.46	4.64
水域	20.68	2.79	20.59	2.78	20.69	2.79	-0.10	0.10	0
城乡用地	0.63	0.08	0.76	0.10	5.89	0.80	0.13	5.13	5.26

表 4 云龙水库流域 2001—2020 年土地利用类型转移矩阵

Table 4 Land use type transfer matrix at Yunlong Reservoir basin during 2001—2020

项目	2001年面积										总计/ km^2
	耕地		林地		草地		水域		城乡用地		
	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%	面积/ km^2	比重/%	
耕地	154.89	20.92	16.22	2.19	8.17	1.10	0.72	0.10	0.11	0.01	180.11
林地	11.40	1.54	386.69	52.24	30.50	4.12	0.74	0.10	0	0.00	429.33
草地	14.91	2.01	28.81	3.89	59.72	8.07	0.82	0.11	0.01	0.00	104.27
水域	0.70	0.09	0.59	0.08	0.99	0.13	18.41	2.49	0	0.00	20.69
城乡用地	5.06	0.68	0.07	0.01	0.24	0.03	0	0.00	0.51	0.07	5.89
总计	186.95	25.25	432.39	58.41	99.64	13.46	20.68	2.79	0.63	0.08	740.29

图 5 云龙水库流域不同土地利用类型(L_1, L_2, L_3)年产水量Fig.5 Annual water yield of different land use types (L_1, L_2, L_3) at Yunlong Reservoir图 6 云龙水库流域不同年降雨量情景(R_1, R_2, R_3)下产水量变化Fig.6 Changes in water yield under different annual rainfall scenarios(R_1, R_2, R_3) at Yunlong Reservoir basin

2.3 不同年降水量情景(R_1, R_2, R_3)下产水量模拟

降雨量的变化受区域气候、人类活动、地形地貌等多重因素影响,2001—2020年云南省降雨量总体呈现先减少后增加的趋势^[25],研究区内降雨量变化趋势与其大致相同。由图6分析可知云龙水库流域产水量与降雨量变化具有一致性,随着降雨量的增加而增加,呈正相关;其中产水量体积最高为2001年 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,最低为2010年 $2.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.4 不同年潜在蒸散发量情景(P_1, P_2, P_3)下产水量模拟

蒸散发量与降雨量同为影响流域产水量的重要气候因子之一,潜在蒸散发、实际蒸散发与土层深度、质地、含水量、太阳辐射、风速等因素密切相关。

由图2可知,2010与2020年潜在蒸散发量大致相同,通过InVEST模型运行得到2010年与2020年年平均潜在蒸散发量分别为888.36和888.31 mm,年平均实际蒸散发量分别为550.54和550.66 mm,基本趋于一致,3期年平均蒸散发量与年平均实际蒸散发量数值取整后如图7所示。可知云龙水库流域不同时期潜在蒸散发量与实际蒸散发量基本趋于平稳,未出现较大变化,均值分别为876和546 mm,但3期降雨量的差别导致实际情景下产水量发生较大变化;2001,2010和2020年降雨量分别为1034,800和900 mm, P_1, P_2 和 P_3 情景均以2001年降雨量输入InVEST模型,将图7中 P_1, P_2 和 P_3 情景下产水量体积与实际情景下2001,2010和2020年产水量 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,

$2.07 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 做皮尔逊相关性分析得到显著性 p 值为 0.251, 表明二者无相关性 ($0 < p < 0.05$ 时二者呈现显著性)。由以上分析可知产水量变化随着蒸散发量的增加而减少, 呈负相关。

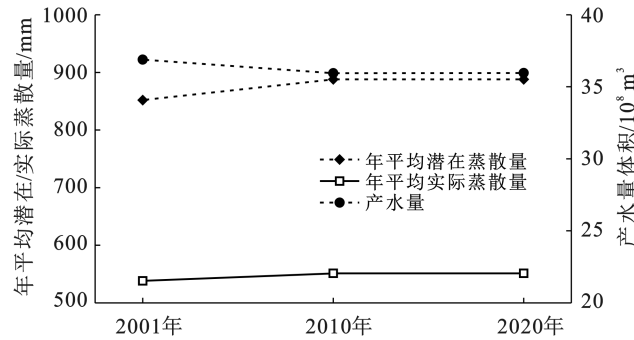


图 7 云龙水库流域不同年潜在蒸散发量情景 (P_1, P_2, P_3) 下产水量变化

Fig.7 Changes of water yield under potential evapotranspiration scenarios (P_1, P_2, P_3) in different years at Yunlong Reservoir basin

2.5 不同因子变化对产水量贡献度分析

在不同的情景设定下, 云龙水库流域产水量时空格局并未发生较大改变, 基本趋于一致, 高值区均出现于东北部、西北部区域, 低值区则均位于中部水域部分。根据表 5 可知, 土地利用变化情景下, 与基准情景 2001 年 (L_1) 相比 2010 年 (L_2), 2020 年 (L_3) 产水量体积分别增加 $4.58 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $1.46 \times 10^6 \text{ m}^3$,

2001—2020 年期间主要的土地类型变化为耕地、林地面积减少和城乡用地面积增加, 产水量不减反增, 其主要原因是耕地、林地中农作物和植被的蒸腾作用导致该地类蒸散发量较高, 而城乡用地相比之下植被覆盖较少, 所产生的蒸散发量大幅下降, 加之下垫面的不透水层减少降水渗入地下。年降雨量变化情景下, 2010 年 (R_2) 和 2020 年 (R_3) 较之基准情景 2001 年 (R_1) 产水量体积分别减少 $1.55 \times 10^8 \text{ m}^3$, $9.06 \times 10^8 \text{ m}^3$; 年潜在蒸散发量变化情景下, 与基准情景 2001 年 (P_1) 相比 2010 年 (P_2), 2020 年 (P_3) 产水量体积分别减少 $9.48 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $9.34 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。通过以上结果表明, 总体上云龙水库流域降雨量对产水量影响最为显著。由表 6 可以看出 2001—2010 年土地利用、降雨量、年潜在蒸散发量变化对产水量变化贡献度 W_L, W_R, W_P 分别为 0.28%, 93.98%, 5.74%; 2001—2020 年相较 2001—2010 年时间跨度增长, 期间研究区内历经云龙水库建设、水源保护区移民搬迁、城镇化建设等, 引起土地利用类型的较大变化; 同时, 气温作为影响年潜在蒸散发量的主要因素^[25], 林地减少和城乡用地增加加速了白天地表温度的上升, 且云南自 2001 年以来多次经历旱灾, 其中 2009—2012 年遭受史无前例的连年旱灾; 故土地利用变化、年潜在蒸散发量变化对研究区产水量变化的贡献度 W_L, W_P 增加, 分别为 1.93% 和 12.41%, 但降雨量变化依旧占主导位置, 贡献度 W_R 为 85.66%。

表 5 云龙水库流域不同情景下产水量体积及变化

Table 5 Volume and change of water yield under different situations at Yunlong Reservoir basin

项目	年份(情景)	产水量体积/ 10^4 m^3	与 2001 年相比变化量/ 10^4 m^3
基准情景	2001 年 (L_1, R_1, P_1)	36 887.43	0
土地利用类型变化	2010 年 (L_2)	36 933.25	45.82
	2020 年 (L_3)	37 033.12	145.69
年降雨量变化	2010 年 (R_2)	21 376.58	-15 510.86
	2020 年 (R_3)	27 828.54	-9 058.89
年潜在蒸散发量变化	2010 年 (P_2)	35 939.55	-947.89
	2020 年 (P_3)	35 953.03	-934.40

表 6 云龙水库流域不同因子变化对产水量变化的贡献度

Table 6 Contribution of different factors to change of water yield in Yunlong Reservoir basin %

贡献度	2001—2010 年	2001—2020 年
W_L	0.28	1.93
W_R	5.74	12.41
W_P	93.98	85.66

注: W_L, W_R, W_P 分别表示土地利用、降雨量、潜在蒸散发量变化对产水量变化的贡献度。

3 讨论

本研究运用 InVEST 模型与 ArcGIS 软件对昆明市主要的集中式饮用水源地云龙水库流域产水量服务功能时空格局进行评估分析, 将情景分析法和差值比较法相结合, 深入探究与产水量变化相关影响因素之间的关系, 模拟结果与杜佳衡^[21]、黄欣等^[25]人一样证实该模型在云南具有良好的适用性, 可用于水源

地小流域产水量时空变化模拟评估。结果表明云龙水库流域 3 个时期产水量时空格局分布总体由西南向东北逐渐增加,中部偏低,东北部偏高,具有较高的一致性;不同时期之间产水量变化在空间分布上表现相对均匀。产水量受气候因子影响最大,产水量随降水量的增加而增加,显著正相关,与蒸散量呈负相关;土地利用类型变化对产水量变化影响最小。通过不同时期土地利用类型转移矩阵分析得出年产水量最高的土地利用类型为林地,表明不同土地利用类型面积占比是影响该地类年产水量的主要因素;而产水能力最高的为城乡用地,较低的则为林地与水域,表明在 InVEST 模型产水量模拟评估中蒸散系数、土壤含水量、下垫面性质等因素对地类产水能力影响较大;虽然在 2001—2020 年土地利用类型面积变化当中林地减少,增加了研究区的产水量,但林地的减少与城乡用地的增加不利于水源地保护区土地利用类型结构的优化和生态保护,且林地对于云龙水库水源区具有防治水土流失、净化水体、改善水质等优点,所以近年来昆明市政府加强了水源地保护区的管理及政策的贯彻落实工作,这些措施必将对云龙水库流域内土地利用类型结构和生态保护起到促进作用。

流域内产水量变化与云龙水库向昆明市提供的供水服务功能关系密切,受旱灾影响,2010 年为研究区产水量最低的年份,云龙水库水位急剧下降,供水能力大大降低,2001—2020 年随着云南旱灾的减轻,研究区内产水量逐步增加,云龙水库供水能力日渐回升。可见,产水量与水库供水功能服务呈正相关,产水量的增加可为云龙水库向昆明市提供安全可持续的供水条件,且云龙水库流域产水量呈季节性分布特点,水库可根据这一特点,在雨季进行封库蓄水,合理优化供水配置,从而安全、持续、稳定地向昆明市提供供水服务,保障昆明市市民们生活生产用水。

InVEST 模型评估结果具有定量、空间可视化等优点,本次云龙水库流域产水量时空分布的模拟评估结果可为云龙水库水源地生态环境可持续发展、生态补偿机制和水源地保护管理等政策的合理制定提供科学依据。该模型产水量模块基于的是水量平衡原理,主要考虑降水、植物蒸散发和地表截留的影响,对地下水和地表水的相互转化有所忽略;本次研究缺乏一定的实测条件,数据来源大多基于全国尺度获取,分辨率较低,对模拟评估有一定的影响,在未来研究当中,可加强数据的本地化获取,提高模型输入数据分辨率,进一步提升模型模拟精度。

4 结论

(1) 云龙水库流域年内产水量呈季节性分布,多

集中于夏季;2001,2010 和 2020 年产水量总体趋势为先减少后增加,3 期年平均产水量体积为 $2.82 \times 10^8 \text{ m}^3$,产水量体积最高值为 2001 年 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,最低值为 2010 年 $2.07 \times 10^8 \text{ m}^3$;研究区内产水量空间分布为中部偏低,东北部、西北部偏高,整体由西南向东北增加。

(2) 在土地利用类型产水量分析中得出,林地是流域内年产水量最高的土地利用类型,其次由大到小为耕地、草地、水域、城乡用地。林地对水源地具有防治水土流失、净化水体、改善水质等优点,故而水源涵养林的建设十分必要且意义重大。

(3) 通过 2001—2020 年不同因子对产水量变化的影响分析得出针对云龙水库流域,对产水量最为显著的影响因子为降雨量,贡献度为 85.66%;其次为蒸散发量,贡献度为 12.41%;较之最低的为土地利用类型变化的影响,贡献度仅为 1.93%。

气候因子是云龙水库流域产水服务功能的主导因素,土地利用类型最小,云龙水库作为昆明市最大的集中式饮用水源地,未来应继续加强水源地的生态保护、水源涵养林的建设,减少人类生产生活中向大气释放的废热,降低人类活动改变下垫面性质对气候产生的消极影响,从而才能安全、绿色、环保、高效、可持续地为昆明市饮用水提供保障。

[参 考 文 献]

- [1] Daily G C. Natures Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999(5): 19-25.
- [3] 赵同谦,欧阳志云,王效科,等.中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].自然资源学报,2003(4):443-452.
- [4] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics,1998,25(1):253-260.
- [5] 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.
- [6] 胡宝怡,王磊.陆地水储量变化及其归因:研究综述及展望[J].水利水电技术(中英文),2021,52(5):13-25.
- [7] Stephen P, Gregory V, Insu Koh, et al. Global use of ecosystem service models [J]. Ecosystem Services, 2016,17:131-141.
- [8] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
- [9] Bejagam V, Keesara V R, Sridhar V. Impacts of climate

- change on water provisional services in Tungabhadra basin using InVEST Model [J]. *River Research and Applications*, 2021, 38(1):94-106.
- [10] 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]. *The journal of applied ecology*, 2013, 24(1): 183-189.
- [11] Yang Dong, Liu Wen, Tang Lingying, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: applicability of the InVEST model [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182:133-143.
- [12] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 等. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9):2899-2906.
- [13] Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang, et al. Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(3):72-83.
- [14] Budyko M I. *Climate and Life* [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [15] Sharp R, Douglass J, Olwero, et al. *InVEST User's Guide* [M]. Stanford:the Natural Capital Project, 2022.
- [16] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2):W02502.
- [17] Jafarzadeh A A, Mahdavi A, Shamsi S F, et al. Annual water yield estimation for different land uses by GIS-Based InVEST model: case study: Mish-khas Catchment, Ilam Province, Iran [J]. *Journal of Rangeland Science*, 2019, 9(1):1-12.
- [18] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3):701-708.
- [19] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君, 等. 中国土壤有效含水量分布 [J]. *地理学报(英文版)*, 2005, 15(1):3-12.
- [20] Yan Fapeng, Shangguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1):74-86.
- [21] 杜佳衡, 王锦. 基于 InVEST 模型的大理州永平县水生态系统服务功能时空变化分析 [J]. *西部林业科学*, 2021, 50(6):91-102.
- [22] 胡砚霞, 于兴修, 廖雯, 等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1): 73-82.
- [23] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨 [J]. *资源科学*, 2010, 32(8):1544-1550.
- [24] 洪忠. 云龙水库水源保护区水源涵养林建设探讨 [J]. *林业建设*, 2020(2):42-48.
- [25] 黄欣, 彭双云, 王哲, 等. 基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10):2813-2821.

(上接第 384 页)

- [22] 段红腾, 吴发启, 杨一凡, 等. 近 10 年巴音河流域土地利用变化及驱动力分析 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2):172-177.
- [23] 何俊仕, 王志新, 付玉娟, 等. 西辽河平原土地利用/覆被变化特征分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2016(11):66-69, 73.
- [24] 呼和孟古拉. 干旱区土地利用/覆被变化及生态安全评价研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [25] 刘军会, 高吉喜, 耿斌, 等. 北方农牧交错带土地利用及景观格局变化特征 [J]. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 148-154.
- [26] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1):174-182.
- [27] 周建, 张凤荣, 徐艳, 等. 基于降水量与土壤类型的北方农牧交错区土地利用/覆被格局及变化分析: 以科尔沁左翼后旗为例 [J]. *地理研究*, 2017, 36(7):1210-1222.
- [28] 陈雪萍, 赵学勇, 王瑞雄, 等. 气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42(3):170-177.