

doi: 10.6046/zrzyyg.2021182

引用格式: 叶勤玉, 杨世琦, 张强, 等. 三峡库区(重庆段)水源涵养功能遥感监测及时空分布特征分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 184–193. (Ye Q Y, Yang S Q, Zhang Q, et al. Analysis on water conservation function using remote sensing method in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 184–193.)

三峡库区(重庆段)水源涵养功能遥感监测及时空分布特征分析

叶勤玉^{1,2}, 杨世琦^{1,2}, 张强³, 王舒⁴, 何泽能^{1,2}, 郑颖慧³

(1. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2. 重庆市农业气象与卫星遥感工程技术研究中心, 重庆 401147; 3. 重庆市气象局, 重庆 401147; 4. 国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 水源涵养功能是生态系统最重要的功能之一, 可以为生态系统和人类保持、提供水资源。本研究根据水源涵养的物理含义, 使用叶面积指数、植被覆盖度、蒸散代表植被层的水源涵养能力, 使用地表温度、土壤含水量、坡度代表土壤层的水源涵养能力, 通过主成分分析法构建水源涵养遥感监测综合指标模型, 探索三峡库区水源涵养功能时空分布特征。结果表明, 水源涵养生态功能指数(water conservation index, WCI)客观耦合了各个指标信息, 能够快速简便地对三峡库区水源涵养生态功能进行评估, 合理地代表了评估区域的水源涵养生态能力。2019年, 三峡库区水源涵养能力分布不均, 呈现下游强、上游弱的空间分布格局, 渝东北以森林生态系统为主, 水源涵养功能最强。2013—2019年7 a来, 三峡库区大部分区域WCI处于略微增加趋势, 其中, 以丰都、开州、云阳的部分区域增加得较为明显。

关键词: 水源涵养; 三峡库区; 生态系统服务功能; 遥感

中图法分类号: 文献标志码: A 文章编号: 2097-034X(2022)02-0184-10

0 引言

水是生命之源, 其中淡水资源仅占全球水资源总量的2.5%左右^[1], 人类能够直接利用和生产的水量非常少。水源涵养是生态系统(如森林、灌丛、草地等)通过其特有的结构与水相互作用, 对降水进行截留、渗透、蓄积, 并通过蒸散实现对水流、水循环的调控^[2]。水源涵养是陆地生态系统重要生态服务功能之一, 其变化将直接影响区域气候水文、植被和土壤状况, 是区域生态系统状况的重要指示器^[3]。

生态系统水源涵养功能评估研究已成为国内外众多学者的研究重点, 主要包括综合蓄水能力法^[4]、水量平衡法^[5-6]、模型法^[7-10]、林冠截流量法^[11]、降水贮存量法等^[12]。这些方法多是从生态以及水文模型角度研究生态系统水源涵养能力, 所用模型参数多是小尺度上的实验观测结果, 这些参

数在大尺度上难以获取, 而且评估结果受气象条件尤其是当年降水的影响较大。同时, 由于模型所需基础数据难以及时更新, 评估结果的时效性有待提高。目前鲜见利用遥感技术对水源涵养功能进行评估, 而遥感数据具有可重复性获取、覆盖范围广、获取数据速度快、周期短等优势, 对于大尺度上的水源涵养能力评估具有十分明显的优势, 有助于动态跟踪生态系统水源涵养能力的变化。徐涵秋^[13]基于遥感信息技术提出一个新型的遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI), 以主成分变换来集成各个指标, 各指标对RSEI的影响是根据其数据本身的性质来决定, 而不是由人为的加权来决定。这个指数被应用到了多个区域评估区域生态质量^[14-16], 这些研究对于建立水源涵养综合指标评估模型有参考意义。

三峡库区是我国重要的水源涵养区, 也是长江上游重要的生态屏障。在区域尺度上评估三峡库区

收稿日期: 2021-06-16; 修订日期: 2021-08-02

基金项目: 重庆市自然科学基金项目“多源遥感协同的西南地区土壤水分时空变化监测研究”(编号: cstc2020jcyj-msxmX1009)、重庆市自然科学基金项目“基于北斗系统的重庆市土壤湿度监测关键技术研究”(编号: cstc2020jcyj-msxmX1026)及重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目“重庆市三峡库区水源涵养功能遥感监测评估方法研究”(编号: ZHCXTD-201926)共同资助。

第一作者: 叶勤玉(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事卫星遥感应用技术研究。Email: yeqinyu0427@163.com。

通信作者: 杨世琦(1980-), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事卫星遥感应用技术研究。Email: yangshiqi1980@sina.com。

水源涵养功能空间特征及其变化趋势,对科学认识和合理保护我国生态系统水源涵养,制定生态环境保护决策具有十分重要的意义。本研究综合利用遥感技术优势,构建水源涵养生态功能综合指标模型,分析水源涵养生态功能时空变化,为生态环境保护、构建社会-自然协同发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

重庆市是我国典型的山水城市,处于青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,属于我国陆地地势

的第二阶梯,境内地貌以山地、丘陵为主,多呈现“一山一槽二岭”的形态,地形较为复杂。区域内河流众多,水资源十分丰富。流经重庆的河流主要有长江、嘉陵江、乌江、涪江、綦江等。其中,长江干流自东北向西南横贯全境,流程长达 665 km,嘉陵江于渝中区汇入长江,乌江于涪陵区汇入长江。三峡库区(重庆段)位于长江上游的末端,是我国重要的水源涵养区和长江上游重要的生态屏障,地理范围介于E105°49′~110°12′、N28°31′~31°44′之间。辖区东邻湖北、湖南,南接贵州,西至四川,北连陕西,幅员面积达 46 158 km²,约占整个三峡库区面积的 80%^[17],下文中三峡库区均指三峡库区(重庆段)(图 1)。

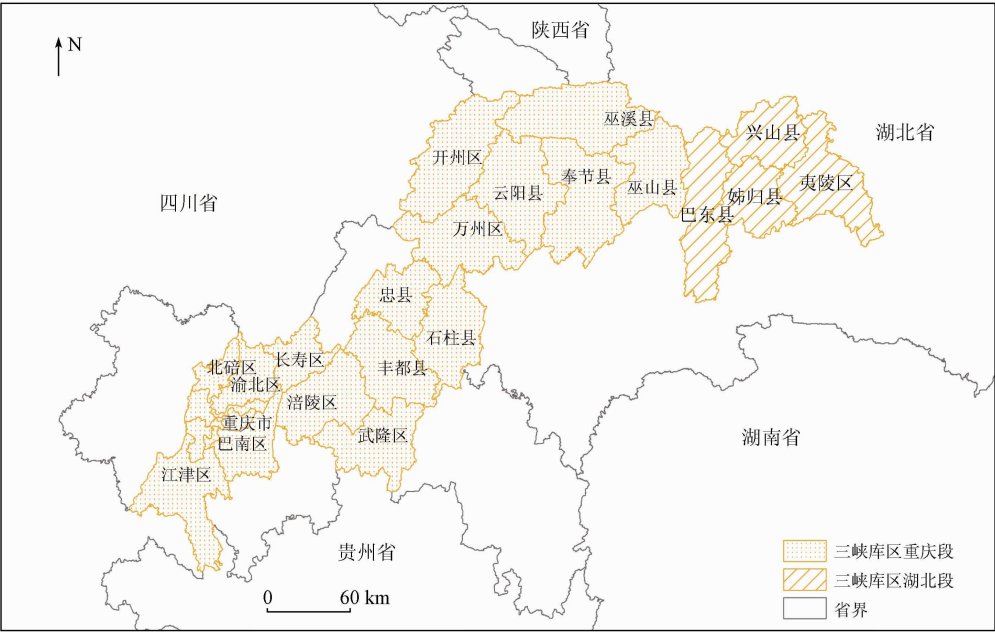


图 1 三峡库区行政区划图及区域划分
Fig.1 Administrative map and regional division of the Three Gorges Reservoir area

三峡库区位于北半球副热带内陆地区,属于亚热带季风性湿润气候。冬暖春早,夏热秋凉,四季十分分明,海拔高度在 100 ~ 2 768 m 之间(图 2),多年平均气温 15 ~ 18 ℃,气温年较差和日较差较大。

其中下半年由于受太平洋东南暖湿气流和印度洋西南暖湿气流的影响,降水十分丰富,多年平均降水量为 1 150 mm,但空间分布不均。

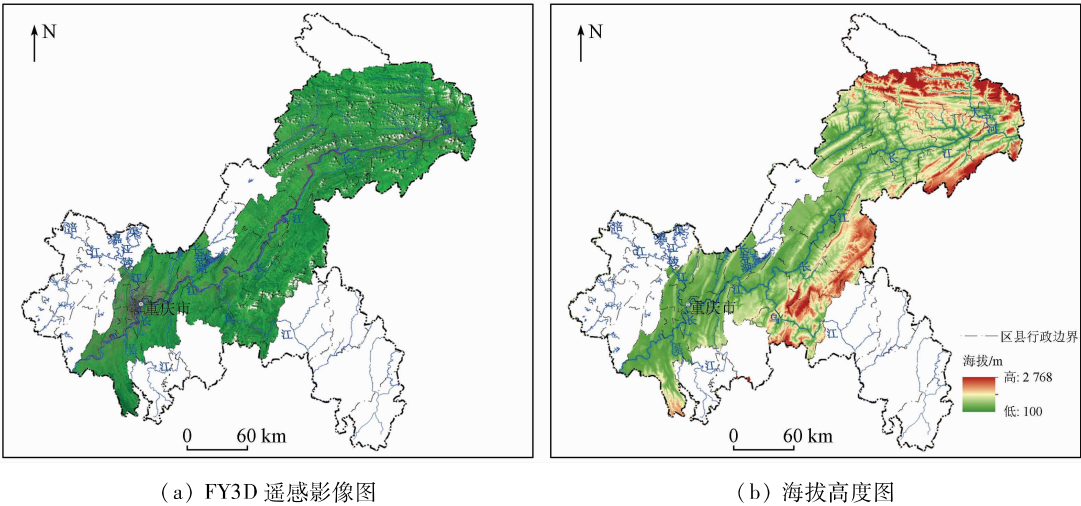


图 2 三峡库区(重庆段)FY3D 遥感影像图和海拔高度图
Fig.2 FY3D image and DEM image of the Three Gorges Reservoir area(Chongqing section)

1.2 数据源及预处理

中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的重要传感器,具有 36 个光谱通道,可同时获得来自陆地,海洋和大气的信息。本研究使用 MODIS 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、叶面积指数、地表温度、蒸散产品参与水源涵养生态功能综合指标模型构建。数据产品投影类型为正弦 (曲线) 投影 (sinusoidal)。被动微波辐射计 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 搭载于 GCOM - W1 (Global Change Observation Mission for Water - 1) 卫星上,于 2012 年 5 月 18 日发射,是 AMSR - E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System) 辐射计的后继。AMSR2 天线扫描角度为 55° , 包含 6.9/7.3/10.65/18.7/23.8/36.5/89.0 GHz 共 7 个频率 V 极化和 H 极化 14 个通道数据。AMSR2 土壤水分产品空间分辨率为 10 km, 投影方式为等经纬度投影。本研究使用 AMSR2 土壤水分产品参与水源涵养生态功能综合指标模型构建。研究中利用中国 1 000 m 分辨率数字高程模型数据集生成三峡库区坡度数据。详细数据情况见表 1。

表 1 数据来源及基本情况

Tab.1 Data source and basic information

数据类型	数据精度	数据来源	数据描述
NDVI	空间分辨率 250 m, 时间分辨率 16 d	NASA 地球科学数据	MODIS 植被指数产品, MOD13Q1
叶面积指数	空间分辨率 500 m, 时间分辨率 8 d	NASA 地球科学数据	MODIS 叶面积指数产品, MOD15A2H
地表温度	空间分辨率 1 000 m, 时间分辨率 8 d	NASA 地球科学数据	MODIS 地表温度产品, MOD11A2
蒸散	空间分辨率 500 m, 时间分辨率 8 d	NASA 地球科学数据	MODIS 蒸散产品, MOD16A2
地表分类	空间分辨率 500 m, 时间分辨率年	NASA 地球科学数据	MODIS 土地覆盖类型产品, MCD12Q1, IGBP 全球植被分类方案将地表覆盖分为 17 类
坡度	空间分辨率 1 000 m	寒区旱区科学数据中心	由中国 1 000 m 分辨率数字高程模型计算而来
土壤水分	空间分辨率 10 km, 时间分辨率月	JAXA 日本宇宙航空研究开发机构	AMSR2 土壤水分产品

为了便于进行后续研究,对原始的影像数据产品进行了以下处理:

1) 影像拼接,重投影。将数据进行拼接,并重新投影为 Albers 等面积投影,数据空间分辨率统一重采样为 250 m。

2) 数据合成。采用最大化合成法将 NDVI 合成月数据,并对月数据进行年平均值计算。采用最大化合成法对叶面积指数进行了月合成以及年合成,得到年最大叶面积指数。对地表温度产品进行了月平均合成以及年平均合成,得到年平均地表温度。对蒸散数据进行了月累积合成以及年累积合成,得到年累积蒸散量。

3) 通过与研究区域高分辨率遥感影像叠加对比,发现 IGBP (International Geosphere - Biosphere Programme) 地表分类产品在水体分类上不够精确,因此基于 IGBP 地表分类产品,并利用高分数据提取的水体^[18]对 IGBP 地表分类中水体分类进行校正。

2 研究方法

2.1 水源涵养生态功能综合指标模型

2.1.1 生态因子分析

生态系统水源涵养量主要由 2 部分组成,一部分是森林林冠层截留储量,另一部分是森林的土壤对水分的拦截、渗透与储藏雨水的数量总和^[11]。生态系统水源涵养功能是林冠层、枯落物层和土壤层这三者水源涵养功能的总和。生态系统水源涵养能力受多种因素的影响,《生态保护红线划定指南》^[2]中通过净初级生产力 (net primary productivity, NPP)、降雨、坡度等因子计算水源涵养服务能力指数,水量平衡方程中通过降雨、蒸散以及径流的关系计算水源涵养量。已有研究表明,植被层截留降水的能力是指降水过程中林冠的截留能力^[19],是冠层和林下灌丛、草丛的持水量。植被覆盖率的增加会减少年径流量,从而使降水的损耗减少^[20]。区域实际蒸散量对流域水源涵养能力的影响非常显著^[21],蒸散与生态系统水源涵养能力呈现显著的正相关。因此,本研究中使用叶面积指数、植被覆盖度和蒸散代表植被层的水源涵养能力,其中植被覆盖度使用像元二分模型计算^[22]。

地表温度与生态系统水源涵养量具有较强的相关性,是影响其能力的一个重要因子^[23],反映了环境热度。坡度是地表单元陡缓的程度,地形创造了局部生境的小气候条件,进而影响植被格局和土壤层理化性质及土壤层厚度^[24]。坡度也是目前常用的用来计算流域产水量的生态系统服务和交易的综

合评估(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)模型中的一个重要因子^[25]。土壤含水量是指保持在土壤孔隙中的水分。土壤层是生态系统水源涵养过程的第三个活动层,储存的土壤水分是生态系统巨大的水分贮蓄库和水文调节器^[26]。研究中使用地表温度、坡度和土壤含水量代表土壤层的水源涵养能力。

三峡库区 2019 年各生态因子空间分布如图 3 所示。下游渝东北的北部最大叶面积指数较高,上

游渝西南地区最大叶面积指数较低。植被覆盖度较高的地方主要集中在山区,与山脉走势基本一致,农用耕地比例较高的平坝丘陵地区植被覆盖度较低,城镇区域植被覆盖度最低。植被较好的区域蒸散较高,重庆主城区蒸散较低。地表温度空间分布差异明显,渝西南及重庆主城区地表温度较高,中部及渝东北地区地表温度较低。江津区、长寿区、忠县等区县土壤含水量较高;巫溪、武隆、重庆主城区等区县土壤含水量较低。

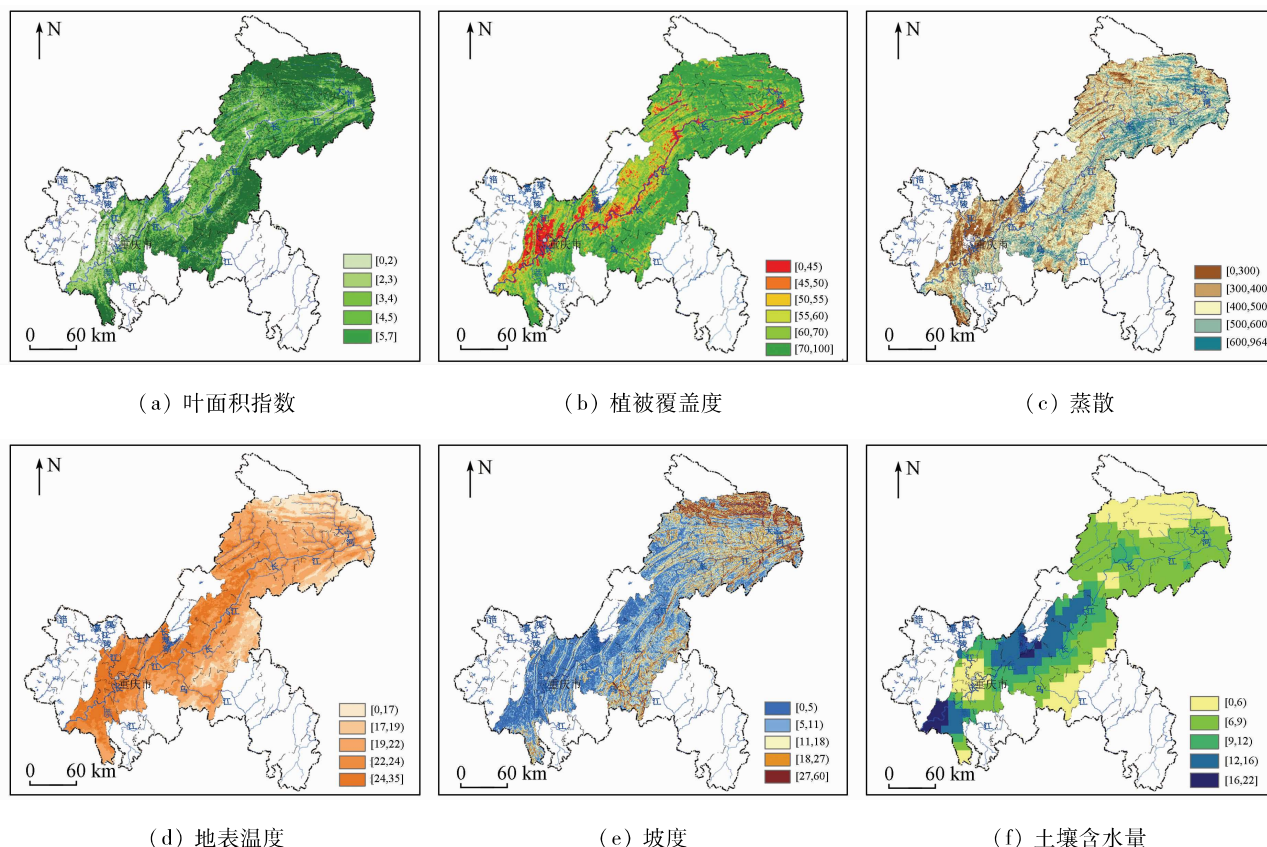


图3 2019年三峡库区(重庆段)各生态因子分布图

Fig.3 Spatial distribution of various ecological factors in the Three Gorges Reservoir area(Chongqing section) in 2019

2.1.2 模型构建

已有研究表明,水源涵养能力主要和植被层和土壤层有着密切的关系,本研究通过水源涵养的物理含义,同时参考《生态保护红线划定指南》以及相关研究文献,利用叶面积指数、植被覆盖度、蒸散、地表温度、坡度、土壤含水量等生态因子,用主成分分析方法建立综合指标评价模型。

主成分分析法是把原来多个变量划为少数几个综合指标的一种统计分析方法,从数学角度看,是一种数据降维处理方法^[27]。主成分分析法的主要思想是将 n 维数据特征映射到 k 维上,当 n 较大时,如果对 n 维数据分析,是较为困难的,因此需要用较少的 k 维综合指标代替原有的 n 维数据,这 k 个指标既能尽量多的反映原来较多变量指标所反映的信

息,同时又是相互独立的。这 k 维是全新的正交特征也被称为主成分,具体分析步骤为:

1) 假设有 m 个研究区域, n 个选择指标的原始样本矩阵($x_1, x_2, \dots, x_n$)为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) 首先将样本矩阵 X 进行标准化处理,计算其协方差矩阵 R ,并通过雅克比法计算出其特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$,使其按照大小顺序排列,求出对应的特征向量 $e_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$,由此得到主成分 T_n 为:

$$\begin{cases} T_1 = e_{11} x_1 + e_{21} x_2 + \cdots + e_{n1} x_n \\ T_2 = e_{12} x_1 + e_{22} x_2 + \cdots + e_{n2} x_n \\ \dots\dots\dots \\ T_n = e_{1n} x_1 + e_{2n} x_2 + \cdots + e_{nn} x_n \end{cases} \quad (2)$$

3) 取前 k 个主成分 $T_1, T_2, \dots, T_k$, 那么这 k 个主成分就可以用来反映原来 n 个指标的信息。

采用主成分变换来进行模型构建, 其最大优点就是模型中各指标的权重不是人为确定, 而是根据数据本身的性质、根据各个指标对各主分量的贡献度来自动客观地确定, 从而在计算时可以避免因人设定权重造成的结果偏差。

为了获得足够的样本数据, 模型构建以 2019 年整个重庆市生态因子数据为基础, 将各因子进行拼接、转投影、裁剪、归一化处理、无效值剔除等预处理手段, 得到主成分系数矩阵表(表 2)。

表 2 2019 年各主成分系数矩阵表

Tab. 2 Matrix table of principal component coefficients in 2019

要素	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分	第五主成分	第六主成分
叶面积指数	0.64	0.59	-0.31	-0.22	-0.31	0.07
植被覆盖度	0.37	0.17	0.19	0.35	0.74	0.36
蒸散	0.16	-0.06	-0.15	0.88	-0.33	-0.25
土壤含水量	-0.52	0.78	0.26	0.16	0.00	-0.13
地表温度	-0.27	-0.01	-0.16	0.15	-0.32	0.88
坡度	0.29	-0.08	0.87	-0.02	-0.38	0.10

表 3 2013—2019 年第一主成分系数表

Tab. 3 The first principal component coefficients from 2013 to 2019

第一主成分	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	平均值
叶面积指数	0.60	0.69	0.66	0.71	0.67	0.73	0.64	0.67
植被覆盖度	0.41	0.36	0.40	0.39	0.40	0.40	0.37	0.39
蒸散	0.17	0.14	0.10	0.12	0.03	0.10	0.16	0.12
土壤含水量	-0.49	-0.44	-0.38	-0.39	-0.44	-0.25	-0.52	-0.42
地表温度	-0.33	-0.29	-0.38	-0.29	-0.31	-0.38	-0.27	-0.32
坡度	0.29	0.32	0.34	0.31	0.32	0.31	0.29	0.31

故而水源涵养综合指标模型为:

$$WCI = 0.67LAI + 0.39VC + 0.12ET - 0.42SMC - 0.32LST + 0.31SLOPE, \quad (3)$$

式中: WCI 为水源涵养生态功能指数(water conservation index); LAI 为叶面积指数; VC 为植被覆盖度; ET 为蒸散; SMC 为土壤含水量; LST 为地表温度; $SLOPE$ 为坡度。

2.2 变化趋势分析

为了定量研究三峡库区 2013—2019 年水源涵养生态功能的变化趋势, 采用一元线性回归分析的方法, 对研究区每个格网点上 2013—2019 年近 7 a 的因子进行回归模拟, 并利用最小二乘法计算出每个像元的变化趋势和变化幅度, 公式为:

由表 2 可知, 第一主成分中表征植被状态信息的叶面积指数、植被覆盖度、蒸散系数都为正值, 说明它们共同对水源涵养能力起正面的贡献, 植被越好的地方水源涵养能力越高, 这与龚诗涵等^[3]、曾莉等^[28]的研究相符, 能力高的水源涵养主要集中在蒸散发量较大, 植被覆盖率高的地区; 而代表环境热度的地表温度呈负值, 说明它对水源涵养能力起负面的影响; 代表环境干度的土壤湿度呈负值, 这是由于重庆区域特殊的地形条件, 高山地区由于坡度较高且植被较好, 植被林冠截留了部分降水, 土壤含水量较低, 而平坝丘陵地区由于地形及农田灌溉等人为因素的影响, 土壤含水量反而较高, 因此土壤含水量在模型中为负值。由于重庆区域山地较多, 坡度越高的地方受人为影响越小, 植被状况相对较好, 有利于涵养水源, 因此其系数为正值, 这与实际情况以及已有研究相符。

采用 2013—2018 年的重庆市最大叶面积指数、植被覆盖度、蒸散、土壤含水量、地表温度、坡度进行主成分分析, 其第一主成分系数如表 3 所示。由表中可以看到, 在不同的年份, 各指标因子的在第一主成分中的权重接近且稳定, 并能合理的对水源涵养生态能力进行解释。取其多年平均值可以对区域水源涵养生态功能进行评价并分析其变化趋势, 该权重能够最大限度的集合各指标的信息并不受人为因素的影响, 使每个因子能合理、客观地对生态现象进行解释。

$$Trend = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times C_i - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n C_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (4)$$

式中: n 为统计时间段年数; i 为时间变量; C_i 为每个像元的值。Trend 反映的是水源涵养生态功能在研究期内的变化趋势, $Trend > 0$ 表示水源涵养能力在研究期内处于增加趋势, 反之则为减少趋势。通过 Trend 分布图可以明显看出研究区域在 2013—2019 年中水源涵养能力的变化趋势以及变化幅度。

3 结果与分析

3.1 水源涵养生态功能指数空间分布

使用式(3)计算 WCI 值,评估三峡库区水源涵养生态功能,结果如图 4 所示,2019 年,三峡库区年平均 WCI 为 0.47。库区下游渝东北地区的巫山、巫溪、奉节,中部武隆、丰都、石柱等地区由于植被状况较好,WCI 值较高,水源涵养能力较强;上游渝西南区域以及重庆主城区区域由于植被状况较差,WCI 值较低,是水源涵养能力的薄弱区域。三峡库区水源涵养功能呈现出东北部、东南部能力强,西南部低,主城区最低的空间分布格局。这与齐静等^[29]、李莉等^[11]研究结果有较好的一致性。

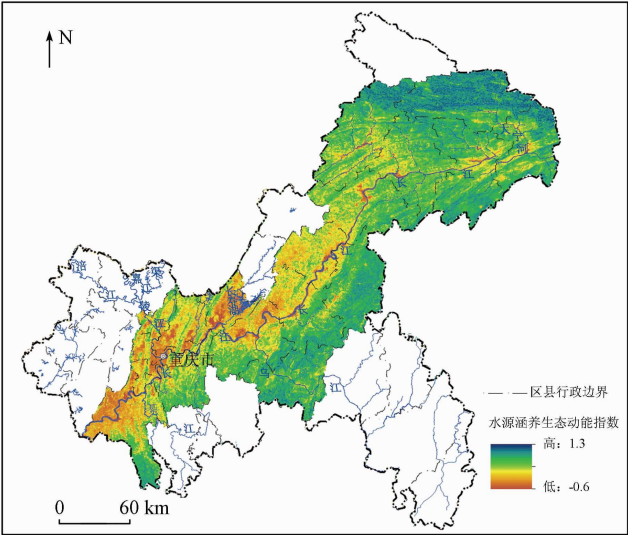


图 4 2019 年三峡库区(重庆段) WCI 分布图
Fig.4 The distribution of WCI in the Three Gorges Reservoir area(Chongqing section) in 2019

水源涵养生态功能综合指标模型中的生态因子是一个长期累积的变化结果。相比于水量平衡法、降雨截留法、InVEST 模型等方法需要使用当年降雨数据来评估水源涵养量,本研究构建的 WCI 值不会受气象条件的影响剧烈变化,反映的是整体生态环境、生态系统的变化带来的水源涵养能力的变化。同时,遥感数据的可重复性获取、时效性较高、监测面积广是本研究的优势所在,WCI 值能及时的监测到由于人类活动对生态系统带来的改变而造成的水源涵养能力的变化,这对于区域生态环境监管具有重要意义。

3.2 下垫面性质对水源涵养生态功能指数的影响

根据 MODIS 土地利用分类数据,分析三峡库区不同土地利用类型上水源涵养生态服务能力,结果如表 4 所示:按生态系统类型分,WCI 呈现森林 > 草地 > 作物 > 城市和建成区 > 裸地的特点,这和已

有的研究相符,同时也从侧面印证了森林冠层的降水截留率最大,草地次之,耕地最小这一已有研究结果。其中,由于城市和建成区中存在的公园、城市绿化等能够涵养水源的因素,使其 WCI 略高于裸地,但是仍然都是负值。在森林生态系统中,落叶阔叶林 > 针阔混交林 > 常绿针叶林 > 常绿阔叶林;草地生态系统中,多树草原 > 稀树草原 > 草地;作物中,作物和自然植被的镶嵌体 > 作物,表现出水源涵养能力高植被覆盖区大于低植被覆盖区的特点,符合生态系统水源涵养能力的一般规律^[30],这和实际情况以及已有研究相符^[31-32]。由于叶面积指数和蒸散在湿地和水体中部分为空值,因此其统计结果未纳入表 4 中。

表 4 不同生态系统 WCI 平均值

Tab.4 The average WCI of different ecosystem

生态系统类型(1 级)	生态系统类型(2 级)	平均 WCI
森林	常绿阔叶林	0.65
	常绿针叶林	0.72
	针阔混交林	0.81
	落叶阔叶林	0.92
草地	多树草原	0.68
	稀树草原	0.30
	草地	0.22
作物	作物	0.15
	作物和自然植被镶嵌体	0.23
城市和建成区	城市和建成区	-0.13
裸地	裸地	-0.17

3.3 水源涵养生态功能重要性分布

采用自然断点法对 WCI 值进行等级划分,将三峡库区水源涵养生态功能分为一般重要、重要、极重要 3 个类别,如图 5 所示。自然断点分级法是一种

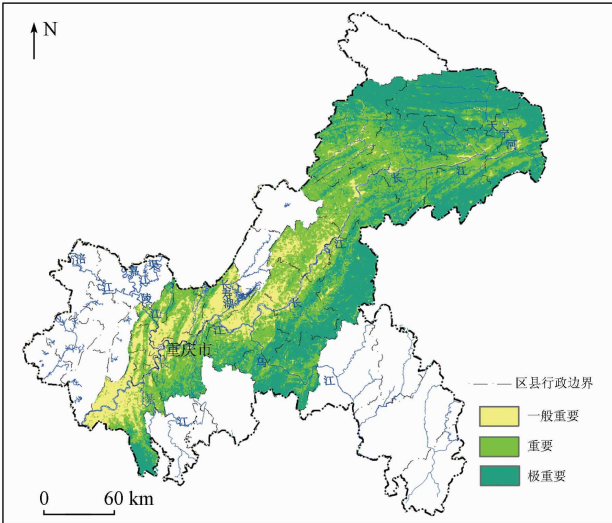


图 5 2019 年三峡库区(重庆段)水源涵养生态功能重要性分布图
Fig.5 Spatial characteristic of water conservation importance in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) in 2019

基于数据本身分布特点进行分组的方法,可以使每个分类类间差异最大,类内差异最小。 $WCI > 0.6$ 为水源涵养生态功能极重要区,主要分布在三峡库区下游秦巴山区以及渝东南武陵山区部分区域,这和《全国生态功能区划(修编版)》中水源涵养极重要区的分布一致^[33]。主要包括渝东北的巫山、巫溪、奉节以及石柱、武隆、丰都的南部等地区。这些地区森林生态系统为主,而森林是涵养水源的主体,因此是水源涵养生态功能的极重要区。 WCI 在 $0.2 \sim 0.6$ 之间为水源涵养生态功能重要区,主要分布在万州、开州、云阳、巴南的南部等区县。这些区县以自然植被和作物混合体为主,并含有部分稀树草原,是水源涵养的重要区。 $WCI < 0.2$ 为水源涵养生态功能一般重要区,主要分布在重庆主城地区、长寿、江津等区县,这些地区人类活动强烈,自然植被保持面积

少,是水源涵养功能的一般重要区。

3.4 水源涵养生态功能多年变化趋势分析

利用 2013—2019 年多源卫星遥感数据,计算不同年份 WCI ,并分析其变化趋势。结果表明,2013—2019 年,三峡库区 WCI 整体呈现略微增加趋势,平均年变化率为 0.004(图 6(a))。其中,2013—2018 年,年平均 WCI 基本呈增加趋势,到 2018 年达到最大值,2019 年 WCI 较 2018 年下降明显。这是由于 2019 年植被覆盖度、蒸散均较 2018 年有明显的下降,造成 2019 年较 2018 年 WCI 下降较明显。2013—2019 年,三峡库区不同等级 WCI 整体变化不大(图 6(b)),其中 > 0.6 (极重要)等级相对而言上升趋势较为明显; < 0.2 (一般重要)、 $[0.2, 0.6]$ (重要)等级略有下降。

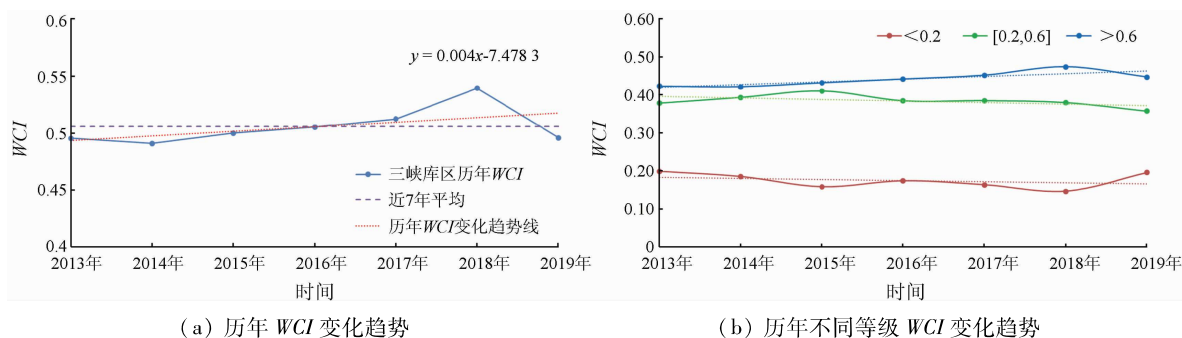


图 6 2013—2019 年三峡库区(重庆段)年均以及不同等级 WCI 变化图

Fig. 6 Changes of annual average and different levels of WCI in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing Section) from 2013 to 2019

采用一元线性回归分析的方法计算 2013—2019 年三峡库区 WCI 的变化斜率,并利用自然断点法对变化趋势率进行了等级划分,从图 7 中可以看出,2013—2019 年 7 a 来,三峡库区大部分区域 WCI

处于略微增加趋势,其中,以丰都、开州、云阳的部分区域增加得较为明显,渝北、北碚、巴南的局部地区 WCI 略微降低,江津区 WCI 无论从降低面积还是趋势都较为明显。

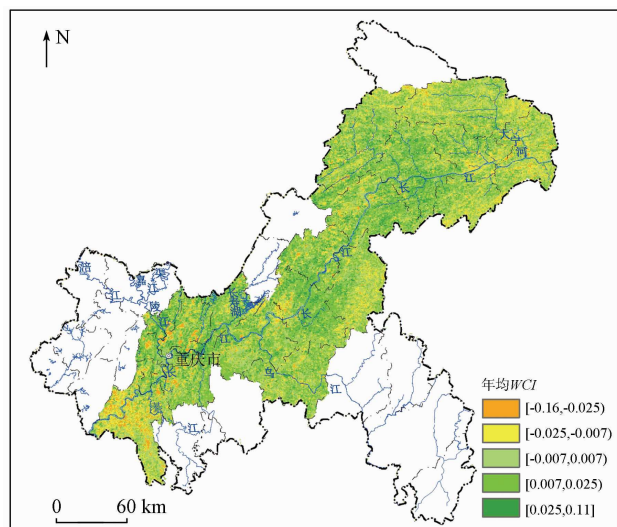


图 7 2013—2019 年三峡库区(重庆段)年平均 WCI 变化趋势分布图

Fig. 7 Spatial pattern of WCI trend in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) from 2013 to 2019

4 结论与讨论

本研究基于水源涵养的物理含义,对利用遥感技术评估生态系统水源涵养功能展开研究,通过主成分分析法构建水源涵养生态功能综合指标模型,分析三峡库区水源涵养能力空间分布特征及变化趋势,主要结论如下:

1) WCI 根据各指标对第一主成分的贡献来集成,客观地耦合了各个指标信息,合理地代表了评估区域的水源涵养生态能力。

2) 2019 年三峡库区水源涵养能力分布不均,呈现下游强、上游弱的空间分布格局。渝西南地区由于人类活动较为剧烈,水源涵养功能较弱。渝东北、渝东南以森林生态系统为主,水源涵养功能最强。

在不同的生态系统类型中,*WCI* 呈现森林 > 草地 > 作物 > 城市和建成区 > 裸地的特点,符合生态系统水源涵养能力的一般规律。2013—2019 年 7 a 来,三峡库区大部分区域 *WCI* 处于略微增加趋势,其中,以丰都、开州、云阳的部分区域增加得较为明显,渝北、北碚、巴南的局部地区 *WCI* 略微降低,江津区 *WCI* 无论从降低面积还是趋势都较其他地区更为明显。

但这个方法目前还存在以下不足:

1) 这个用来评估生态系统水源涵养能力的综合指标模型只能说明不同区域水源涵养功能的相对强弱以及反映其多年来的变化趋势,并不能代替区域的实际水源涵养量,其和区域实际水源涵养量的关系有待进一步研究。

2) 综合评估模型中各指标因子的数据精度、空间分辨率将影响 *WCI* 数据的精度和分辨率。获取高分辨率的 *WCI* 数据对于监测区域水源涵养生态功能变化具有重要意义。

3) 未来将尝试提升各指标因子的空间分辨率和精度,以期获取更高质量的区域 *WCI* 数据服务于生态文明建设。

参考文献 (References):

- [1] Ball P. Water, water everywhere? [J]. *Nature*, 2004, 427 (6969): 19–20.
- [2] 环境保护部. 生态保护红线划定指南[M]. 北京: 环境保护部, 2015.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Ecological protection red line delineated Guide [M]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2015.
- [3] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37 (7): 2455–2462.
Gong S H, Xiao Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (7): 2455–2462.
- [4] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. *自然资源学报*, 2004, 19 (3): 351–360.
Shi P L, Wu B, Cheng G W, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19 (3): 351–360.
- [5] 王升堂, 孙贤斌, 夏韦, 等. 生态系统水源涵养功能的重要性评价——以皖西大别山森林为例[J]. *资源开发与市场*, 2019, 35 (10): 1252–1257.
Wang S T, Sun X B, Xia W, et al. Evaluating on significance function of water conservation in forest ecosystem – Taking Dabieshan Mountain in western Anhui Province as an example [J]. *Resource Development & Market*, 2019, 35 (10): 1252–1257.
- [6] Xu J, Xiao Y, Xie G D. Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10 (4): 362–372.
- [7] 李盈盈, 刘康, 胡胜, 等. 陕西省子午岭生态功能区水源涵养能力研究[J]. *干旱区地理*, 2015, 38 (3): 636–642.
Li Y Y, Liu K, Hu S, et al. Water conservation function of Ziuling Ecological Area in Shanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38 (3): 636–642.
- [8] 程一凡. 基于 InVEST 模型的三江源国家公园水源涵养量变化与草地生态补偿研究[D]. 云南: 云南财经大学, 2019.
Cheng Y F. Study on the change of water conservation capacity and grassland ecological compensation in Sanjiangyuan National Park based on InVEST model [D]. Yunnan: Yunnan University of Finance and Economics, 2019.
- [9] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 等. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J]. *生态学报*, 2020, 40 (3): 993–1003.
Lv L T, Ren T T, Sun C Z, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (3): 993–1003.
- [10] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28 (3): 577–585.
Liu J, Fu B, Zhang C H, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28 (3): 577–585.
- [11] 李莉, 苏维词, 葛银杰. 重庆市森林生态系统水源涵养功能研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22 (2): 96–100.
Li L, Su W C, Ge Y J. Analysis on water conservation capacity of forest ecosystem in Chongqing [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (2): 96–100.
- [12] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 等. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2020 (15): 1–17.
Pan M, Chen T W, Huang L, et al. Spatial and temporal variations in ecosystem services and its driving factors analysis in Jing-Jin-Ji region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020 (15): 1–17.
- [13] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33 (5): 889–897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33 (5): 889–897.
- [14] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (7): 91–97, 294.
Xu H Q. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (7): 91–97, 294.
- [15] 施婷婷, 徐涵秋, 孙凤琴, 等. 建设项目引发的区域生态变化的遥感评估——以敖江流域为例[J]. *生态学报*, 2019 (18): 1–14.
Shi T T, Xu H Q, Sun F Q, et al. Remote-sensing-based assess-

- ment of regional ecological changes triggered by a construction project: A case study of Aojiang River Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019(18): 1–14.
- [16] 杨绘婷, 徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 533–542.
- Yang H T, Xu H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 533–542.
- [17] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 168–178.
- Li Y C, Liu C X, Min J, et al. RS/GIS based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 168–178.
- [18] 张德军, 杨世琦, 王永前, 等. 基于 GF-1 数据的三峡库区水体信息精细化提取[J]. *人民长江*, 2019, 50(9): 233–239.
- Zhang D J, Yang S Q, Wang Y Q, et al. Refined water body information extraction of Three Gorges reservoir by using GF-1 satellite data[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(9): 233–239.
- [19] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. *资源科学*, 2002, 24(6): 68–73.
- Deng K M, Shi P L, Xie G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of yangtze river and its benefits[J]. *Resources Science*, 2002, 24(6): 68–73.
- [20] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 森林生态系统水源涵养服务功能解析[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1679–1686.
- Zhou J W, Gao J X, Gao Z Q, et al. Analyzing the water conservation service function of the forest ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1679–1686.
- [21] 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 S S, Liu K, Bao Y B, et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1546–1554.
- [22] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26: 153–159.
- Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 26: 153–159.
- [23] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 49–57.
- Yin Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the Source Region of the Yellow River from 1981 to 2010[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49–57.
- [24] 李双权, 苏德毕力格, 哈斯, 等. 长江上游森林水源涵养功能及空间分布特征[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 62–67.
- Li S Q, Su D B L G, Ha S, et al. Water conservation function of forest ecosystem and its spatial distribution characteristics in upper reaches of the yangtze river[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 62–67.
- [25] Hu W M, Li G, Gao Z H, et al. Assessment of the impact of the Poplar Ecological Retreat Project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 1–13.
- [26] 郑培龙, 肖江伟, 吴云, 等. 重庆缙云山典型林分林地土壤贮水特性研究[J]. *水土保持研究*, 2006(2): 195–197.
- Zheng P L, Xiao J W, Wu Y, et al. Research on forest soil water retaining properties of typical forests in Jinyun Mountain in Chongqing City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006(2): 195–197.
- [27] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Xu J H. *Econometric geography*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [28] 曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1809–1822.
- Zeng L, Li J, Li T, et al. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 73(9): 1809–1822.
- [29] 齐静, 袁兴中, 刘红, 等. 重庆市三峡库区水源涵养重要功能区生态系统服务功能时空演变特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 256–260, 266, 365.
- Qi J, Yuan X Z, Liu H, et al. Spatio temporal characteristics of ecosystem service in key water resource conservation function area of Three Gorges Area in Chongqing City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 256–260, 266, 365.
- [30] 惠刚樱, 王宏翔. 关于森林生态系统服务功能评价的思考[J]. *温带林业研究*, 2018, 1(3): 5–9.
- Hui G Y, Wang H X. Consideration on the evaluation of forest ecosystem service function[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2018, 1(3): 5–9.
- [31] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15 a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2453–2462.
- Gu Z M, Jin X B, Shen C Z, et al. Variation and influence factors of water conservation service function in Jiangsu Province from 2000 to 2015[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11): 2453–2462.
- [32] 崔景轩, 李秀芬, 郑海峰, 等. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3026–3038.
- Cui J X, Li X F, Zheng H F, et al. Spatial analysis of water conservation function in northeast China under different climatic conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3026–3038.
- [33] 环境保护部. 全国生态功能区划(修编版)[M]. 北京: 环境保护部, 2015.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. *National ecological function zoning (revised version)*[M]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2015.

Analysis on water conservation function using remote sensing method in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)

YE Qinyu^{1,2}, YANG Shiqi^{1,2}, ZHANG Qiang³, WANG Shu⁴, HE Zeneng^{1,2}, ZHENG Yinghui³

(1. *Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China*; 2. *Chongqing Engineering Research Center of Agrometeorology and Satellite Remote Sensing, Chongqing 401147, China*; 3. *Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China*; 4. *National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China*)

Abstract: Water conservation is one of the most important functions of an ecosystem and can maintain and provide water resources for the ecosystem and humans. According to the physical meaning of water conservation, this study used leaf area index, vegetation coverage, and evapotranspiration to represent the water conservation of the vegetation layer and used surface temperature, soil moisture content, and slope to represent the water conservation capacity of the soil layer. Then, this study developed a remote sensing monitoring and evaluation model for water conservation through principal component analysis to explore the spatial – temporal distribution characteristics of the water conservation capacity in the Three Gorges reservoir area. The results show that the water conservation index (WCI) contained the objective information of various indices, could be used to quickly and conveniently assess the water conservation function in the Three Gorges Reservoir area, and properly represented the water conservation capacity there. In 2019, the water conservation capacity was unevenly distributed in the Three Gorges reservoir area and was high downstream and low upstream. The northeastern part of Chongqing was dominated by forest ecosystems and had the strongest water conservation function. From 2013 to 2019, the WCI slightly increased in most areas, especially in some parts of Fengdu, Kaizhou, and Yunyang areas.

Keywords: water conservation; Three Gorges Reservoir area; ecosystem services; remote sensing

(责任编辑: 李 瑜)