文章编号：2097-096X(2023)-03-0222-14

长江流域水系统生态服务价值评价方法

郑　阳，于福亮，桑学锋，张思琦，李子恒
(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京　100038)

摘要：为完善人类活动影响下的生态系统评价体系、实现对生态关键要素的价值识别与评估。本文通过将生态系统服务价值(ESV)评价与改进的水资源综合模拟与调配模型(WAS)耦合，量化识别“自然-社会”二元水循环对区域生态系统功能的支撑作用，提出水系统生态服务价值(ESV-W)评价方法。将该方法应用于 2005—2020 年长江流域水系统的生态服务价值评价中，研究结果表明：2005—2020 年长江流域水系统生态服务价值(ESV)由 31.04 万亿增长到 42.08 万亿，高价值区域(>30 万元/hm^2)集中在长江中下游及两湖地区；水系统的生态服务价值(ESV-W)分项来看，单方水的生态效益从 19.20 元/m^3提高到 24.98 元/m^3，其中 2020 年的农业灌溉、生态补水和自然水循环的效益分别为 8.21 元/m^3、194.93 元/m^3、43.13 元/m^3。

关键词：生态系统服务价值；水循环系统；WAS 模型；生态效益；长江流域
中图分类号：TV213；X171.1　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr.20230037

1　研究背景

2016 年，国务院印发《长江经济带发展规划纲要》，将长江流域生态环境保护与修复摆在首要位置，随着《关于加快推进长江经济带农业面源污染治理的指导意见》《关于加强长江经济带工业绿色发展的指导意见》《关于加快建立流域上下游横向生态保护补偿机制的指导意见》《深入打好长江保护修复攻坚战行动方案》等重大政策的陆续出台，以及《长江保护法》的正式实施的，长江流域“生态优先、绿色发展”进入新阶段。研究长江流域的生态服务价值、开展生态系统关键要素评价，对构建绿色可持续发展格局具有重要现实和科学意义。

生态系统服务(Ecosystem Services，ES)是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接提供的各种经济和非经济的服务[1]，其功能取决于一定时空内的生态系统结构和生态过程，可分为两大类：一类是生态产品，例如食物、材料、药品等；另一类是生态服务，例如调节气候、净化水和空气、景观美化等[2-3]。生态系统服务价值(Ecosystem Services Value，ESV)是指生态系统所提供服务的经济价值，是衡量区域生态环境与区域经济社会发展相互影响关系的重要指标[4-6]，也是进行生态环境管理、保护、修复和补偿等前提，被广泛应用于生态环境系统的研究中[7-8]。

生态系统服务价值的评价方法方面，常用的方法包括：市场价值法、替代成本法，功能评价法、经济评价法、调查问卷法等[9-12]。Costanza 等[1]在 1997 年较系统的提出了生态系统服务价值估算的原理及方法，在此基础上，联合国世界卫生组织、联合国环境规划署和世界银行联合开展了千年生态系统评估项目(The Millennium Ecosystem Assessment，MEA)[13-14]，系统性的建立了生态服务价值评估体系，随着大量国际合作项目的开展，生态系统的服务价值的分类标准趋于成熟[15]。主流研究将生态系统服务分为四大类：(a)供给服务，指直接从自然生态系统中获得的物质或能量，如食物、木材、能

收稿日期：2023-03-03；网络首发时间：2023-04-27
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20230427.0842.001.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC32002002)；中国水利水电科学研究院基本科研项目(01882104)；中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(202103044)
作者简介：郑阳(1988-)，博士生，主要从事水文水资源研究。E-mail：zhengy_sci@outlook.com
通讯作者：桑学锋(1978-)，博士，正高级工程师，主要从事水文水资源、水资源调配及管理决策研究。E-mail：sangxf@iwhr.com

源等；(b)调节服务，指生态系统提供的调节、控制和调整生态系统内部和外部环境的服务，如水循环、土壤保持、气候调节等；(c)支持服务，指自然生态系统对其他生态系统服务的支持，如生物多样性、土壤形成、养分循环等；(d)文化服务，指人们从自然生态系统中获得的精神或文化上的满足和享受，如旅游、景观、文化遗产等。在此分类基础上，土地利用/覆被变化(LUCC)与生态系统服务价值(ESV)研究融合的方法获得了较为广泛的推广和应用[16-21]。

目前，将统计分析与空间分析方法相结合成为研究生态系统服务的较主流方法，同时通过多学科交叉融合，实现生态系统服务价值的动态评价成为当前研究热点，生态供需平衡法、社会网络分析法、能值法、生态元等新方法/概念不断涌现。然而，当前科学研究多集中于区域整体评价层面，对于维持区域生态系统稳定的关键资源要素评价尚处于起步阶段。水系统对维持生态系统结构、生态过程与生态环境发挥着重要作用，同时水资源也是人类生活和经济社会不可或缺的基础性产品，具有典型的“自然-社会”二元特征[22]。随着经济社会发展和人类活动加剧，人类对水资源的开发利用强度不断升高，人水冲突加剧，威胁生态环境结构、影响生态系统功能[23-25]。因此，有必要深入研究水系统对生态系统的支撑作用，以促进水资源合理开发和生态环境保护，为“水资源-经济社会-生态环境”协调发展提供技术支撑。

针对上述问题，本研究提出水系统生态服务价值(Ecological Service Value of Water，ESV-W)评价方法，构建基于水循环及伴生过程的水资源-经济社会-生态环境耦合联动的评价体系。该方法以联合国千年计划(MEA)评价体系为基础，借鉴谢高地等[26]改进的区域生态系统服务价值评价方法[26-29]，耦合并改进桑学锋等[30-31]研发的水资源综合模拟与调配模型(Water Allocation and Simulation Model，WAS)，量化识别“自然-社会”二元水循环对区域生态系统功能的支撑作用。将该方法应用于长江流域2005—2020年生态系统服务价值的演变、“自然-社会”二元水循环的生态服务价值分析中，探讨水资源开发利用过程各分项对生态服务价值的贡献，期望对流域水资源-经济社会-生态环境协调发展的效益评估提供科学参考。同时，该方法也有助于实现对生态关键要素的识别、完善生态系统服务价值评价体系，具有一定的科学研究意义。

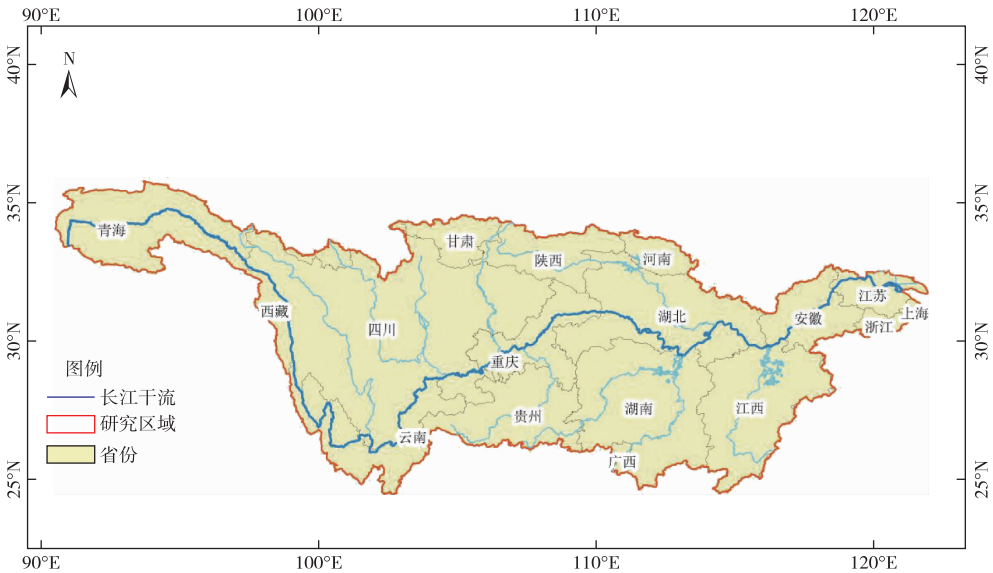


图1　研究区域

Fig.1　The study area

2　研究区域及数据

2.1　研究区概况　长江流域是我国第一大河，世界第三大河，横跨中国东部、中部和西部三大经济区，流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等19个省(自治区、直辖市)，干流全长6363 km，流域面积约180万 km^2，域内总人口4.64亿(2019年)，域内经济

总量占我国 GDP 的约 40%。根据全国第二次水资源调查评价成果(1956—2000 年系列)，长江流域多年平均降水量 1087 mm，年均水资源总量 9958 亿m^3，占全国的 35.9%，如图 1 所示。

2.2　数据来源　研究涉及长江流域 2005—2020 年长系列各地市土地利用、水资源、经济社会、水文气象等多元数据。土地利用/覆被变化(LUCC)数据来源于 Landsat TM/ETM 遥感影像，分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类(见图 2)，本研究融合长江流域各地级市历年农作物种植面积统计数据，将 LUCC 数据进一步细化为水稻、小麦、玉米、蔬菜、旱地、园地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 10 种土地类型。供用水数据来源于长江流域各地级市历年《水资源公报》。水文气象、水利工程数据主要来源于水利部全国水雨情系统、全国河湖大典、水利普查等。经济社会等统计数据主要来源于各地市历年《统计年鉴》，并以省级年鉴作为补充。

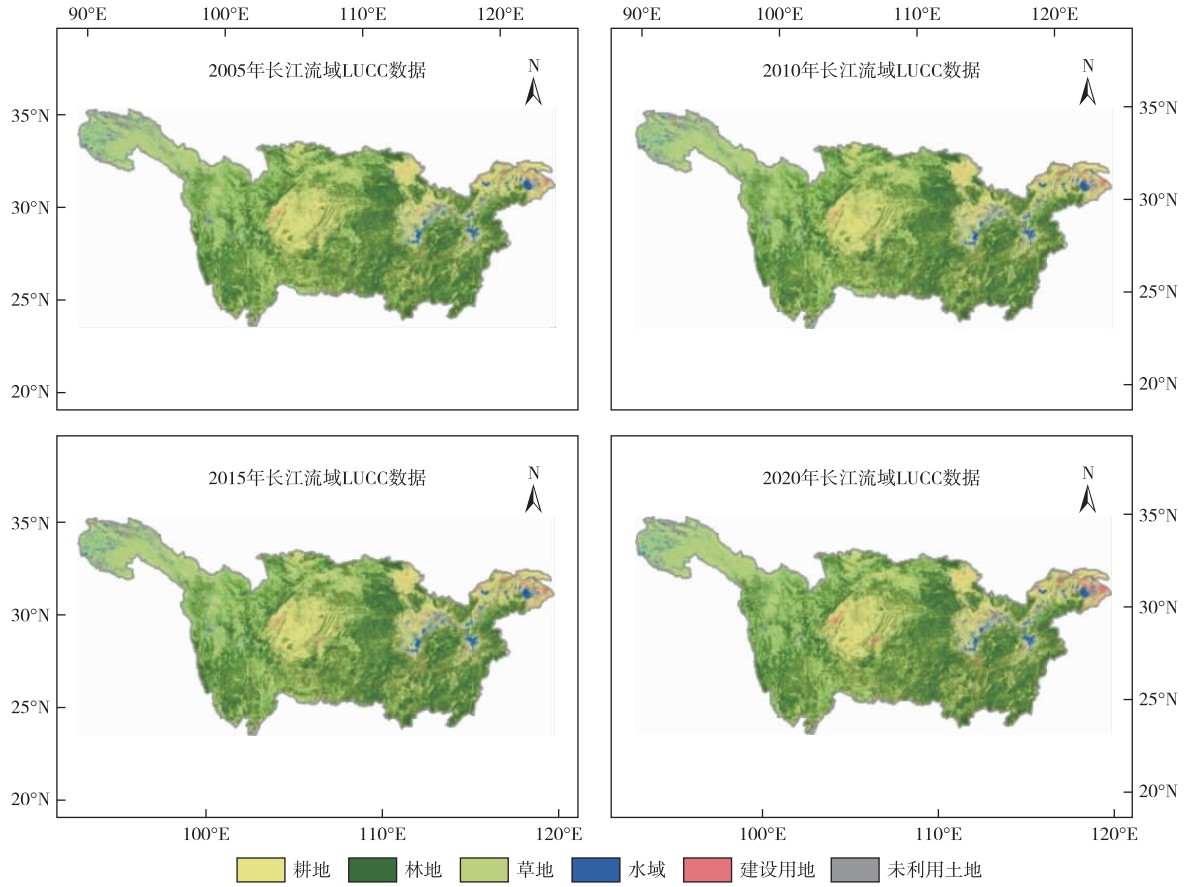


图 2　2005—2020 年长江流域土地利用分类

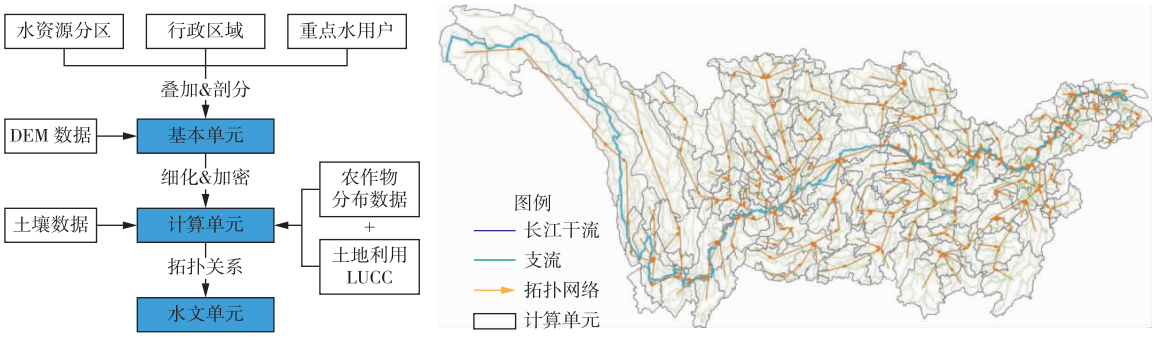
Fig.2　Classification of Land Use in the Yangtze River Basin from 2005 to 2020

2.3　数据处理与模型构建　在水资源三级区套地级市的尺度上采用“基本单元-计算单元-水文单元”三级单元划分方法[30]对长江流域进行计算单元划分(如图 3(a)所示)，形成区域单元 225 个，干流概化单元 38 个、外调水概化单元 6 个，共计划分计算单元 269 个，水文单元 2207 个，并建立各单元间的拓扑网络关系(如图 3(b)所示)。采用 WAS 模型的多元数据融合技术[32]，对上述土地利用、水资源、经济社会、水文气象、水工程等数据进行融合，形成计算单元数据库、实现“自然-社会”水循环模拟与配置，最终实现水循环对区域生态系统功能的支撑作用识别与分析。

3　研究方法

3.1　生态系统服务价值(ESV)评价方法

3.1.1　*生态系统服务价值当量表*　生态服务价值当量表的作用在于通过与标准土地类型提供的生态服务价值对比，表征和量化不同生态系统(土地类型)对生态服务功能的贡献能力[26]。如表 1 所示，其



(a) 单元划分方法　　(b) 长江流域计算单元及拓扑网络

图 3　单元划分及拓扑网络

Fig.3　Compute units and topological network

中数值为无量纲系数，等效于不同生态系统(土地类型)对应不同服务类别的评估权重。本研究基于联合国 MEA 项目评价体系，借鉴谢高地等[26,33]、刘永强等[34]科研成果，结合中国土地利用分类标准(GBT21010-2017)和 WAS 模型的分类方法，将研究区域划分为 10 种土地利用类型，并制定对应生态系统服务价值当量表，见表 1。

表 1　生态系统服务价值当量表

Table 1　The equivalent coefficients table of *ESV*

土地利用类型		水稻	小麦玉米	蔬菜	旱地	园地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	1.36	0.85	0.85	0.6	0.31	0.29	0.22	0.01	0.8	0.12
	原料生产	0.09	0.4	0.4	0.28	0.71	0.66	0.33	0.03	0.23	0.18
	水资源供给	-2.63	0.02	0.02	0.02	0.37	0.34	0.18	0.02	8.29	0.1
调节服务	气体调节	1.11	0.67	0.67	0.67	2.35	2.17	1.14	0.11	0.77	0.63
	气候调节	0.57	0.36	0.36	0.36	7.03	6.5	3.02	0.1	2.29	1.56
	净化环境	0.17	0.1	0.1	0.1	1.99	1.93	1	0.31	5.55	0.66
	水文调节	2.72	0.27	0.27	0.27	3.51	4.74	2.21	0.21	102.24	1.21
支持服务	土壤保持	0.01	1.03	1.03	1.03	2.86	2.65	1.39	0.13	0.93	0.76
	养分循环	0.19	0.12	0.12	0.12	0.22	0.2	0.11	0.01	0.07	0.06
	生物多样性	0.21	0.13	0.13	0.13	2.6	2.41	1.27	0.12	2.55	0.7
文化服务	美学景观	0.09	0.06	0.06	0.06	1.14	1.06	0.56	0.05	1.89	0.31
综合权重		3.89	4.01	4.01	3.64	23.09	22.95	11.43	1.1	125.61	6.27

3.1.2　标准当量因子　标准当量因子是生态系统服务价值的基准，是指单位面积上标准土地类型在自然状态下可以提供的生态服务价值[33]。通常将标准农田在自然条件下经济价值作为基准，相当于本年度粮食单产市场价值的 1/7[35-36]。因此，本研究将 1 hm^2 三大主粮(水稻、小麦、玉米)的平均产值进行折算后，作为标准当量因子。同时，为消除通货膨胀对结果的影响，引入基于中国居民消费指数的修正系数CPI_y，对标准当量因子进行改进，公式可以表达为：

$$UV_y=\frac{q_r\times p_r+q_w\times p_w+q_c\times p_c}{s_r+s_w+s_c}\times\frac{1}{7}\times CPI_y \tag{1}$$

式中：UV_y为第 y 年的标准当量因子，元/hm^2；q_r、q_w、q_c分别为区域的水稻、小麦、玉米产量，kg/hm^2；p_r、p_w、p_c分别为区域的水稻、小麦、玉米的平均价格，元/kg；s_r、s_w、s_c分别为区域的水稻、小麦、玉米的播种面积，hm^2；CPI_y为第 y 年的修正系数。

3.1.3　生态系统服务价值　在确定生态系统服务价值当量表和标准当量因子后，通过分析土地利用/覆被变化(LUCC)数据，计算研究区域不同计算单元、土地利用类型对应的生态系统服务价值，公式可以表达为：

$$esv_{i,k}=A_{i,k}\times P_{i,k}\times UV \tag{2}$$

$$ESV=\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}esv_{i,k} \tag{3}$$

式中：$esv_{i,k}$为计算单元 i 土地利用类型 k 的生态服务价值，元；i 为计算单元，$i=1, 2, \ldots, N$；k 为不同土地利用类型，$k=1, 2, \ldots, K$；A_k为土地利用类型 k 的分布面积，hm^2；P_k为土地利用类型 k 的生态系统服务价值综合当量；ESV 为计算区域的生态系统服务总价值，元。

3.2 水系统的生态服务价值(ESV-W)评价方法

3.2.1 基于 WAS 的水循环耗散识别改进 研究表明，光照、温度和雨量这三个环境要素，是一个地表植被种类分布的关键三要素[37]，对于一个特定区域，其经纬度和地理环境决定了该区域的平均温度和光照呈现规律性和相对稳定性，而水平衡对于植被种群分布具有较强的敏感性[38]。在生态系统服务价值的研究中，地表植被的种类和分布情况是衡量一个区域生态系统服务功能的主要因素。因此，区域水系统对维持生态系统结构、生态过程与生态环境的服务功能发挥着重要作用，其作用机理可以归结为地表植物对于水循环(尤其是土壤水循环)的利用过程，从宏观层面则表现为地表植被的蒸散发作用。

因此，本文通过改进水资源综合模拟与调配模型 WAS，量化识别不同土地利用类型的土壤水蒸散发量，并将其作为衡量水循环对生态系统服务功能支撑作用的表征依据，通过分析不同水源对于生态系统服务价值的贡献，获得“自然-社会”水循环的生态服务价值。WAS 由中国水利水电科学研究院自主研发，解决了复杂水资源系统自然水循环与社会水循环之间的互馈联动科学模拟难题，可以实现对区域/流域水量水质模拟、水资源调配、水资源评价等功能[30-31]，在强人类活动影响下水资源动态演变与调配、水资源保护方面具有突出性能，并且得到了较为广泛的应用[39-42]。

本研究重点考察代表“社会”侧的生态补水、农业灌溉用水，以及代表“自然”侧的自然降水在土壤水循环过程，并通过改进 WAS 模型实现不同水源的量化识别，从而提出水循环的生态服务价值评价方法。由于社会侧用水中工业、生活等其他行业用水的循环过程多发生在人类活动内部，对生态环境的作用较小，既对土壤水循环的蒸散发影响较小，因此不在本次研究范围之内。

基于改进的 WAS 模型，生态、农业、降水对土壤水的补给量，可以表示为：

$$Q'_{k,t}=Q_{k,t}^{eco'}+Q_{k,t}^{agr'}+Q_{k,t}^{pr'} \tag{4}$$

其中：

$$Q_{k,t}^{eco'}=\begin{cases}0, & Q'_{k,t}=0\\ Q'_{k,t}, & 0<Q'_{k,t}\leqslant W_{k,t}^{eco}\\ W_{k,t}^{eco}, & Q'_{k,t}>W_{k,t}^{eco}\end{cases} \tag{5}$$

$$Q_{k,t}^{agr'}=\begin{cases}0, & Q'_{k,t}\leqslant W_{k,t}^{eco}\\ Q'_{k,t}-W_{k,t}^{eco}, & W_{k,t}^{eco}<Q'_{k,t}\leqslant W_{k,t}^{eco}+W_{k,t}^{agr}\\ W_{k,t}^{agr}, & Q'_{k,t}>W_{k,t}^{eco}+W_{k,t}^{agr}\end{cases} \tag{6}$$

$$Q_{k,t}^{pr'}=\begin{cases}0, & Q'_{k,t}\leqslant W_{k,t}^{eco}+W_{k,t}^{agr}\\ Q'_{k,t}-W_{k,t}^{eco}-W_{k,t}^{agr}, & Q'_{k,t}>W_{k,t}^{eco}+W_{k,t}^{agr}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$Q_{k,t}^{eco'}$，$Q_{k,t}^{agr'}$，$Q_{k,t}^{pr'}$分别为土地类型 k 在 t 时段内生态、农业、降水对土壤水的补给量，m^3；$Q'_{k,t}$为土地类型 k 在 t 时段内的土壤水总补给量，m^3；$W_{k,t}^{agr}$为土地类型 k 在 t 时段内的农业灌溉量，m^3；$W_{k,t}^{eco}$为土地类型 k 在 t 时段内的生态补水量，m^3。

土壤水中生态、农业、降水的蒸散发消耗量，可以表示为：

$$E_{k,t}^{eco}=\frac{Q_{k,t-1}^{eco}+Q_{k,t}^{eco'}}{Q_{k,t-1}+Q'_{k,t}}\times E_{k,t}^{s} \tag{8}$$

$$E_{k,t}^{agr}=\frac{Q_{k,t-1}^{agr}+Q_{k,t}^{agr'}}{Q_{k,t-1}+Q'_{k,t}}\times E_{k,t}^{s} \tag{9}$$

$$E_{k,t}^{pr}=\frac{Q_{k,t-1}^{pr}+Q_{k,t}^{pr'}}{Q_{k,t-1}+Q'_{k,t}}\times E_{k,t}^{s} \tag{10}$$

式中：$E_{k,t}^{eco}$，$E_{k,t}^{agr}$，$E_{k,t}^{pr}$分别为土地类型 k 在 t 时段内土壤层中生态补水、农业灌溉和降水的蒸散发消耗量，m^3。

3.2.2　水系统的生态服务价值　通过改进的 WAS 模型对“自然-社会”水循环中土壤水蒸发耗散过程的量化识别与生态系统服务价值研究体系的耦合，解析生态补水、农业灌溉和自然降雨对于生态系统服务功能的支撑作用，实现水系统的生态服务价值(ESV-W)评价，其公式可以表示为：

$$esv^{eco}=\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{eco}}{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{s}}\times esv_k\right)\times\delta^{eco} \tag{11}$$

$$esv^{agr}=\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{agr}}{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{s}}\times esv_k\right)\times\delta^{agr} \tag{12}$$

$$esv^{pr}=\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{pr}}{\sum_{t=1}^{T}E_{k,t}^{s}}\times esv_k\right)\times\delta^{pr} \tag{13}$$

式中：esv^{eco}，esv^{agr}，esv^{pr}分别为生态补水、农业灌溉和自然降雨的生态服务价值，元；δ^{eco}，δ^{agr}，δ^{pr}分别为生态补水、农业灌溉和自然降雨的综合调整系数。

4　结果分析

4.1　生态系统服务价值(ESV)　研究发现，随着国家对生态环境的逐步重视，生态系统的服务价值呈现稳步提高的态势。长江流域的生态服务价值由 2005 年的 31.04 万亿元增长到 2020 年的约 42.08 万亿元，年均增长幅度 2.2%。

从不同土地利用类型带来的生态服务价值方面来看，长江流域 2005~2020 年间的格局基本保持稳定。林地是生态服务价值的主要贡献者，占比约为 51%~52%之间，2020 年估值达到 21.84 万亿元；之后是水域和草地，分别占比约 20.0%和 15.5%，2020 年估值达到 8.43 万亿元和 6.59 万亿元。这主要是因为长江水系发达、中下游地区森林覆盖率较高，以及长江上游地区广袤的草原地带，而生态服务价值的整体空间分布与土壤类别的分布基本保持一致(见表 2)。

表 2　2005—2020 年长江流域生态系统服务价值(按土地类型分)

Table 2　*ESV* of the Yangtze river basin from 2005 to 2020(by land type)

年份	类别	土地类型										总计
		水稻	小麦玉米	蔬菜	旱地	园地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地	
2005	面积/百万 hm^2	11.69	6.46	5.20	21.27	6.82	72.09	42.74	2.54	4.86	5.95	179.41
	ESV/万亿元	0.47	0.23	0.24	0.79	1.48	16.32	4.84	0.03	6.23	0.41	31.04
	占比/%	1.53	0.73	0.79	2.54	4.75	52.56	15.60	0.10	20.08	1.31	100.00
2010	面积/百万 hm^2	12.19	5.86	6.08	21.58	6.40	71.54	42.18	2.88	4.97	5.68	179.41
	ESV/万亿元	0.52	0.27	0.29	0.80	1.70	17.14	5.11	0.04	6.53	0.42	32.82
	占比/%	1.57	0.83	0.88	2.43	5.19	52.22	15.58	0.12	19.90	1.28	100.00
2015	面积/百万 hm^2	12.45	6.63	6.75	20.46	6.91	70.56	41.81	3.27	4.89	5.69	179.41
	ESV/万亿元	0.63	0.36	0.37	0.92	2.09	20.46	6.18	0.06	7.90	0.47	39.43
	占比/%	1.59	0.92	0.93	2.33	5.31	51.90	15.66	0.14	20.03	1.18	100.00
2020	面积/百万 hm^2	12.44	7.19	7.11	19.58	7.01	69.71	41.76	4.02	4.89	5.69	179.41
	ESV/万亿元	0.67	0.39	0.39	0.98	2.24	21.84	6.59	0.06	8.43	0.50	42.08
	占比/%	1.59	0.92	0.93	2.33	5.31	51.90	15.66	0.14	20.03	1.18	100.00

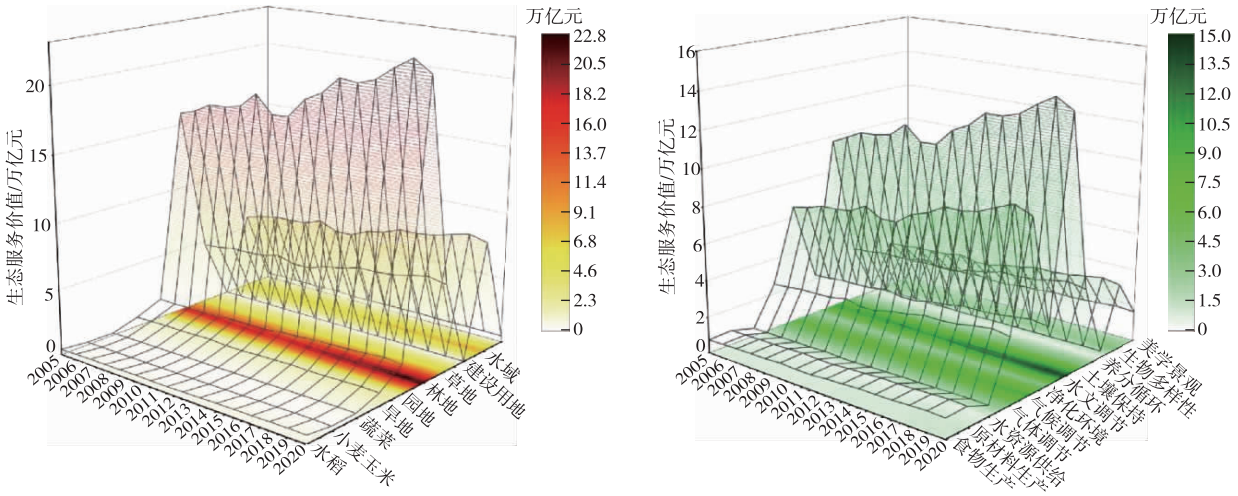
从不同服务类别的角度出发，生态服务价值的主要来源为水文调节和气候调节，分别占比约32.5%和21.8%，2020年分别达到13.68万亿元和9.15万亿元，也从侧面反应出长江流域水系对于区域生态环境的支撑和促进作用。其他服务类型的贡献价值的从大到小的排序依次为：土壤保持、维持生物多样性、气体调节和净化环境等(见表3)。

表3　2005—2020年长江流域生态系统服务价值(按服务类型分)

Table 3　*ESV* of the Yangtze river basin from 2005 to 2020(by service category)

一级类型	二级类型	2005		2010		2015		2020	
		ESV/万亿元	占比/%	*ESV*/万亿元	占比/%	*ESV*/万亿元	占比/%	*ESV*/万亿元	占比/%
供给服务	食物生产	0.76	2.46	0.82	2.50	0.99	2.51	1.06	2.51
	原材料生产	0.80	2.57	0.85	2.58	1.02	2.58	1.09	2.58
	水资源供给	0.45	1.44	0.46	1.39	0.55	1.39	0.59	1.39
调节服务	气体调节	2.62	8.43	2.78	8.46	3.33	8.46	3.56	8.46
	气候调节	6.76	21.77	7.16	21.80	8.58	21.76	9.15	21.76
	净化环境	2.30	7.42	2.44	7.43	2.93	7.42	3.12	7.42
	水文调节	10.11	32.57	10.65	32.45	12.82	32.52	13.68	32.52
支持服务	土壤保持	3.10	9.99	3.29	10.01	3.94	10.00	4.21	10.00
	养分循环	0.27	0.88	0.29	0.89	0.35	0.89	0.37	0.89
	生物多样性	2.66	8.58	2.82	8.59	3.38	8.57	3.61	8.57
文化服务	美学景观	1.21	3.90	1.28	3.90	1.54	3.90	1.64	3.90
总计		31.04	100.00	32.82	100.00	39.43	100.00	42.08	100.00

增长趋势方面，不同土地利用类型分析，蔬菜用地和园林用地的年均增长幅度最大，分别为9.6%和6.5%，之后是建设用地6.0%，而草地、林地等自然植被的增幅低于平均水平，表明人类活动对于长江流域生态系统的影响较大；而从服务类别来看，各服务类别的变化趋势基本稳定，在4.13%的年均增长幅度周围波动，如图4所示。



(a) 生态服务价值增长趋势(按土地类型)　　(b) 生态服务价值增长趋势(按服务类型)

图4　生态系统服务价值增长趋势

Fig.4　The growth trend of *ESV*

生态系统服务价值(ESV)的空间分布情况分析中，结合各计算单元的单位面积*ESV*，对*ESV*进行五等分级：低价值区(<10万元/hm^2)、较低价值区(10~20万元/hm^2)、中等价值区(20~30万元/hm^2)、较高价值区(30~40万元/hm^2)和高价值区(>40万元/hm^2)，获得长江流域典型年生态系统服务价值空间分布图(图5)。

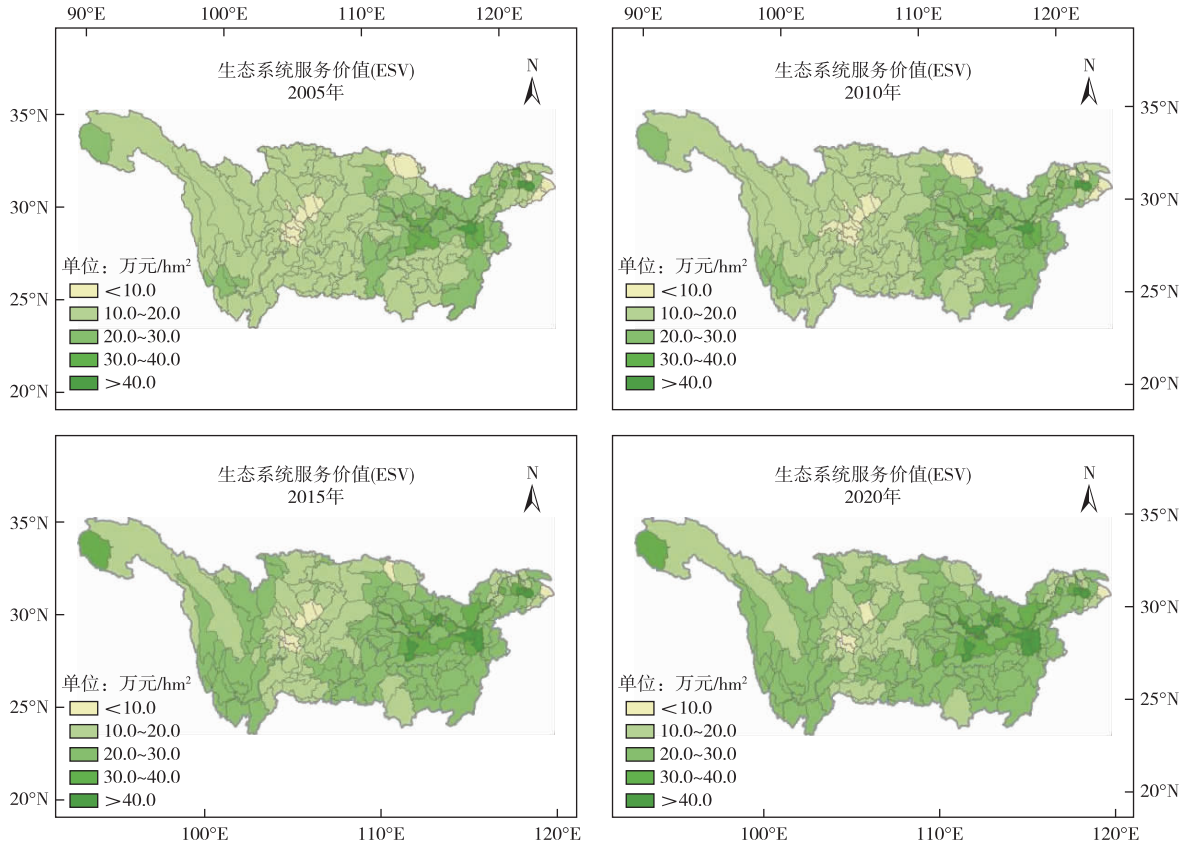


图 5　长江流域生态系统服务价值的空间分布

Fig.5　The spatial distribution map of *ESV* in Yangtze river basin

2005—2020 年间长江流域单位面积 *ESV* 均有不同程度的提高，其中较高及以上价值区域主要集中在长江中下游及两湖地区，该区域森林、湖泊、水系等相对发达；而流域中部的川渝平原区域、长江上游地区的相对较低，川渝平原区域较低主要是由于该区域是中国主要旱地粮食（小麦、玉米等）产区，耕地占比较高，而长江上游则是草地、荒原分布广泛。

省级行政单元的 *ESV* 空间分布情况如表 4 所示，2005 年只有江苏省达到了高或较高 *ESV* 价值水平，到了 2020 年江苏、安徽、江西和湖北 4 个省份实现高或较高 *ESV* 价值水平。而低或较低 *ESV* 价值区域，则由 2005 年的 11 个省级区域缩减为 2020 年的 6 个。15 年间长江流域整体 *ESV* 价值水平显著提高，但也应看到流域内 *ESV* 价值分布不均的情况依然显著，2020 年单位面积 *ESV* 最高的江苏省与最低的重庆市相差约 23.1 万元/hm^2。

4.2　水系统的生态服务价值（ESV-W）　通过生态系统服务价值（ESV）评价体系与水资源综合模拟与调配模型（WAS）耦合，本研究实现了对水系统的生态服务价值进行动态评价，分别从以降水为代表的自然侧水循环和以农业灌溉、生态补水为代表的社会侧水循环，两个角度进行分析，近 15 年的水系统生态服务价值演变情况如表 5 所示。

虽然自然侧水循环依然是维持长江流域生态服务的主要支撑要素（占比 90%以上），社会循环侧水循环带来的生态服务价值呈现逐年稳步提高的态势，由占比约 1.7%提高到 2.6%。其中，农业灌溉的生态服务价值由 2005 年的 6.00 元，提高到 2020 年的 8.21 元，年均增长 2.1%，价值占比保持在 1.2%~1.4%之间；而生态补水带来的生态服务价值由 2005 年的 0.10 万亿，显著提高到 2020 年的 0.52 万亿，年均增长率 10.3%，而服务价值占总生态服务价值的比率则由 0.42%，提高到了 1.23%（见图 6）。

水系统生态服务价值（ESV-W）的空间分布分析中，与 ESV 分类方法类似，将单位用水量的 ESV-W 评价体系分为五级：低价值区（<10 元/m^3）、较低价值区（10~20 元/m^3）、中等价值区（20~30 元/m^3）、较高价值区（30~40 元/m^3）和高价值区（>40 元/m^3），获得长江流域 ESV-W 空间分布图（图 7）。

表 4　2005—2020 年长江流域生态系统服务价值空间分布情况(按省级区域统计)

Table 4　Spatial distribution of *ESV* in the Yangtze river basin from 2005 to 2020(by provincial region)

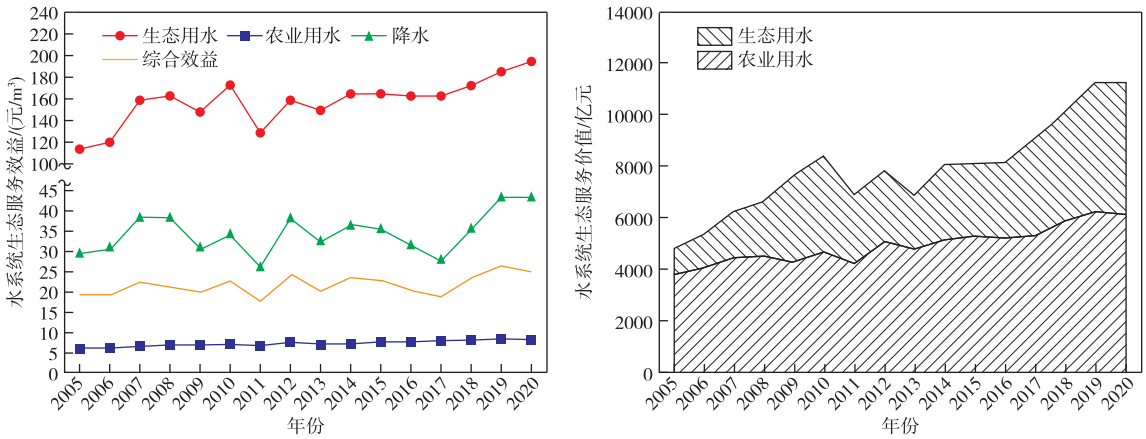
长江流域内各省级区域	2005		2010		2015		2020	
	ESV /亿元	单位面积 *ESV* /(万元/hm²)	*ESV* /亿元	单位面积 *ESV* /(万元/hm²)	*ESV* /亿元	单位面积 *ESV* /(万元/hm²)	*ESV* /亿元	单位面积 *ESV* /(万元/hm²)
上海市	361.36	8.32	344.77	8.15	407.60	9.79	434.94	10.45
江苏省	10015.35	31.39	10095.06	31.69	12007.39	37.73	12812.92	40.26
浙江省	1742.09	13.82	1836.91	14.66	2172.22	17.29	2317.95	18.45
安徽省	13886.83	29.65	14609.39	31.34	17732.43	37.49	18922.03	40.01
江西省	36125.97	23.29	38420.84	24.79	46014.12	29.63	49101.03	31.61
河南省	2488.68	12.45	2805.34	13.86	3415.92	16.60	3645.08	17.72
湖北省	40905.89	27.94	43222.51	29.44	50740.84	33.82	54144.84	36.08
湖南省	43468.62	20.90	45072.53	21.59	53508.11	25.58	57097.76	27.29
重庆市	9745.55	12.99	10276.89	13.64	12078.60	16.08	12888.91	17.16
四川省	69336.66	13.21	73869.05	14.10	89975.96	17.30	96012.10	18.46
贵州省	18467.02	15.70	19560.42	16.62	23788.21	20.16	25384.07	21.51
云南省	19007.98	17.74	20198.46	18.84	24503.99	23.28	26147.87	24.84
西藏自治区	3658.72	15.30	3895.50	16.29	4711.31	19.70	5027.38	21.02
陕西省	10918.39	15.02	11704.03	16.04	14213.91	19.43	15167.47	20.73
甘肃省	5500.23	14.90	5851.14	15.58	7062.55	18.37	7536.35	19.60
青海省	24786.45	16.24	26410.79	17.32	31988.64	20.97	34134.63	22.38

注：本表中浙江、河南、甘肃等跨流域省份，仅统计分析了长江流域内的生态服务价值情况，不能作为全省情况的数据。

表 5　2005—2020 年长江流域水系统的生态服务价值表

Table 5　ESV-W of the Yangtze river basin from 2005 to 2020

年度	农业灌溉			生态补水			自然循环			总生态服务	
	效益 /(元/m³)	价值 /万亿元	占比 /%	效益 /(元/m³)	价值 /万亿元	占比 /%	效益 /(元/m³)	价值 /万亿元	占比 /%	效益 /(元/m³)	价值 /万亿元
2005	6.00	0.37	1.24	113.52	0.10	0.34	29.30	27.99	92.94	19.20	30.11
2010	7.11	0.46	1.32	174.23	0.37	1.06	34.05	32.38	92.12	22.62	35.14
2015	7.58	0.52	1.33	164.26	0.28	0.72	35.11	36.54	92.49	22.81	39.51
2020	8.21	0.61	1.44	194.93	0.52	1.23	43.13	38.67	91.89	24.98	42.08



(a) 水系统的生态服务效益　　(b) 水系统的生态服务价值

图 6　水系统的生态服务价值增长趋势

Fig.6　The growth trend of ESV-W

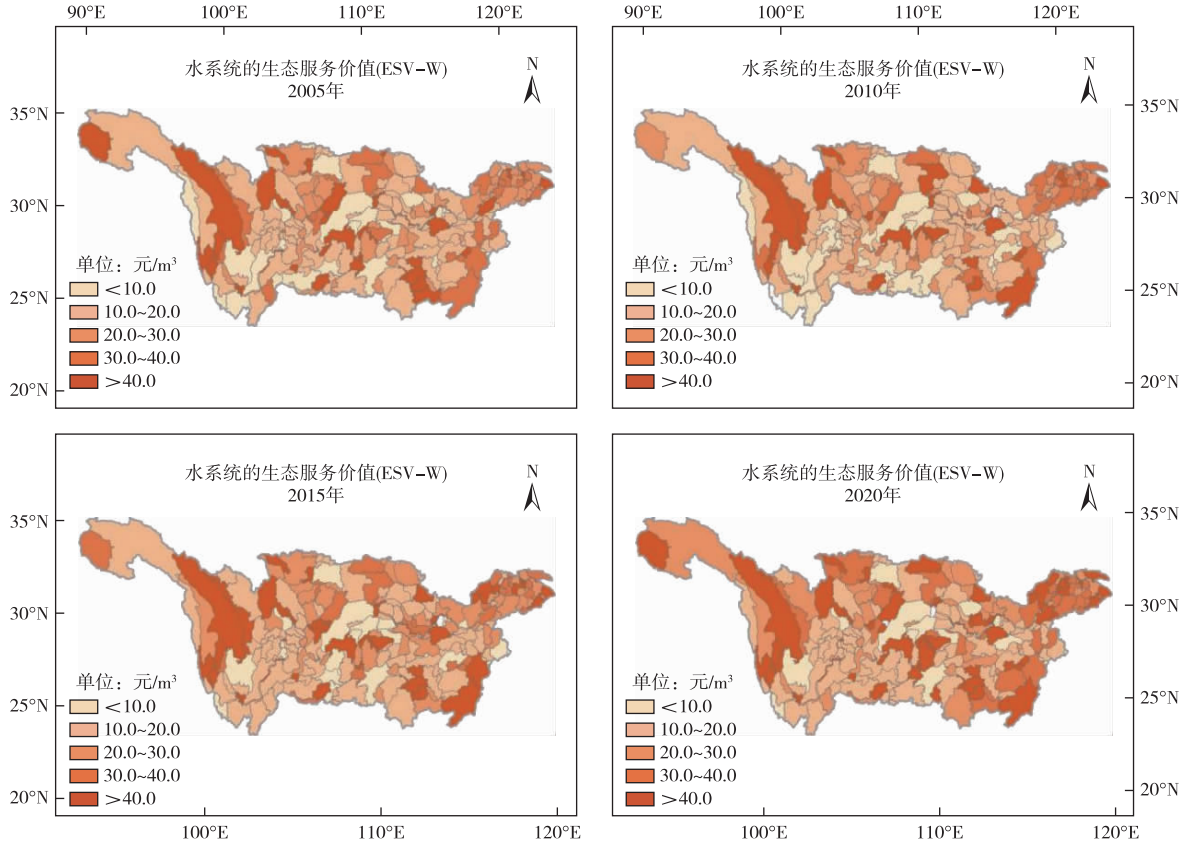


图 7　长江流域水系统生态服务价值的空间分布

Fig.7　The spatial distribution map of ESV-W in Yangtze river basin

2005—2020 年间，长江流域水循环的综合效益均有不同程度的提高，但分布格局较为分散，未发现明显规律。相较而言，湖北、青海、西藏、云南的水循环综合生态服务效益相对较高，其中湖北省 2020 年以 60.26 元/m^{3}领先于长江流域其他省份，而上海、浙江、四川和贵州属于中等或以下价值区水平。水循环的空间分布特征与 ESV 的情况并不一致，由此也见水循环对生态环境的支撑作用相对复杂，需要结合当地实际情况及生态环境基础开展进一步研究(见表 6)。

表 6　2005-2020 年长江流域水系统生态服务价值的空间分布情况(按省级区域统计)

Table 6　Spatial Distribution of ESV-W in the Yangtze river basin from 2005 to 2020(by provincial region)

长江流域内	2005	2010	2015	2020
各省级区域	单位用水 *ESV-W*/(元/m^3)	单位用水 *ESV-W*/(元/m^3)	单位用水 *ESV-W*/(元/m^3)	单位用水 *ESV-W*/(元/m^3)
上海市	12.81	11.98	10.52	13.62
江苏省	29.74	26.78	25.85	31.12
浙江省	15.22	12.07	11.47	14.73
安徽省	28.40	23.55	26.83	33.36
江西省	18.33	14.80	17.17	25.44
河南省	21.83	21.55	31.20	33.88
湖北省	50.17	37.62	47.95	60.26
湖南省	25.72	19.26	25.84	37.67
重庆市	24.26	25.23	29.49	36.41
四川省	19.03	20.37	22.97	24.07
贵州省	20.76	19.83	18.92	21.39
云南省	33.16	33.99	36.47	42.37
西藏自治区	44.92	50.86	98.34	51.45
陕西省	23.37	27.31	37.29	30.83
甘肃省	38.18	41.05	55.16	39.50
青海省	36.83	46.43	50.89	65.69

注：本表中浙江、河南、甘肃等跨流域省份，仅统计分析了长江流域内的生态服务价值情况，不能作为全省情况的数据。

5 结论

本研究提出了一种水系统生态服务价值(*ESV-W*)的评价方法，构建基于水循环及伴生过程的水资源-经济社会-生态环境耦合联动的评价体系，通过与 WAS 水资源调配模型融合，突破了对生态关键要素进行量化评价的难点。将该方法应用于长江流域 2005—2020 年的生态系统服务价值评价，研究结果发现：

(1)2005—2020 年长江流域生态系统服务价值(*ESV*)由 31.04 万亿增长到 42.08 万亿，年均增长幅度 2.2%。按土地类型分析，贡献占比排名前三的是林地、水域和草地，分别占比约 51.9%、20.0%和 15.6%是主要贡献者；按服务类别分析，生态系统的服务功能主要体现为水文调节、气候调节和水土保持三方面，分别占比约 32.5%、21.8%和 10.0%。

(2)从生态系统服务价值(*ESV*)的空间分布情况来看，价值高的区域主要集中在长江中下游及两湖地区，约在 30~60 万元/hm^2之间，与区域森林、湖泊、水系的分布情况相一致。而流域中部的川渝平原区域、长江上游地区的单位面积 *ESV* 较低，约在 5~25 万元/hm^2区间。

(3)2005—2020 年水系统的生态服务价值(*ESV-W*)分项来看，单方效益从 19.20 元/m^3增长到 24.98 元/m^3，其中 2020 年的农业灌溉、生态补水和自然循环的单方效益分别为 8.21 元/m^3、194.93 元/m^3、43.13 元/m^3。总体上看，自然侧水系统提供的生态服务功能占比 96%以上，然而社会侧补水的生态系统支撑作用随着国家对生态保护、绿色发展的重视，近 15 年有了显著的提高。

(4)从水系统的生态服务价值(*ESV-W*)的空间分布情况来看，综合效益均有不同程度的提高，但分布情况较为分散，未发现明显规律。其中，湖北、青海、西藏、云南等地的单方效益较为显著，而长江中游地区相对较低。

本研究期望对流域水循环及伴生过程中水资源-经济社会-生态环境协调发展的效益评估提供科学参考。同时，水系统的生态服务价值评价方法也有助于实现对生态关键要素的识别、完善生态服务价值评价体系，具有一定的科学研究意义。

参 考 文 献：

[1] COSTANZAR, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[2] 欧阳志云，赵同谦，王效科，等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报，2004(10)：2091-2099. (OUYANG Zhiyun, ZHAO Tongqian, WANG Xiaoke, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2091-2099. (in Chinese))

[3] 欧阳志云，郑华，谢高地，等. 生态资产、生态补偿及生态文明科技贡献核算理论与技术[J]. 生态学报，2016，36(22)：7136-7139. (OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, XIE Gaodi, et al. Accounting theories and technologies for ecological assets, ecological compensation and scientific and technological contribution to ecological civilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7136-7139. (in Chinese))

[4] LESLIE H M. Natural capital theory and practice of mapping ecosystem services[J]. Science, 2011, 332 (6035): 1264-1265.

[5] GUERRY A D, POLASKY S, LUBCHENCO J, et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions: from promise to practice[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America, 2015, 112(24): 7348-7355.

[6] BENIS E, MATHIEU R, BELINDA R, et al. Integrating ecosystem services into conservation assessments: a review[J]. Ecological Economics, 2007, 63(4): 714-721.

[7] FISHER B, TURNER K, ZYLSTRA M, et al. Ecosystem services and economic theory: integration for policy-relevant research[J]. Ecological Applications, 2008, 18(8): 2050-2067.

[8] ENGEL S, PAGIOLA S, WUNDER S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an

overview of the issues[J]. Ecological Economics, 2008, 65(4): 663-674.

[9] BOYD J, BANZHAF S. What are ecosystem services? the need for standardized environmental accounting units [J]. Ecological Economics, 2007, 63(2/3): 616-626.

[10] De GROOT R, BRANDER L, Van Der PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.

[11] 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1487-1499. (LIU Gengyuan. A review of a non-monetary valuation of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1487-1499. (in Chinese))

[12] 高慧忠, 许凤冉, 陈娟, 等. 基于水资源价值流的跨区域横向生态补偿标准研究[J/OL]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, [2023-03-21]. https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20220296. (GAO Huizhong, XU Fengran, CHEN Juan, et al. Study on cross regional horizontal ecological compensation standard based on water value flow[J/OL]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, [2023-03-21]. https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20220296. (in Chinese))

[13] M E A. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment[M]. Washington, DC: Island Press, 2003.

[14] M E A. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water[M]. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

[15] COSTANZA R, De GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? [J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.

[16] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102. (XIAO Yu, XIE Gaodi, LU Chunxia, et al. Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3096-3102. (in Chinese))

[17] 危小建, 赵莉, 程朋根, 等. 中国土地利用与生态服务价值空间动态研究——以地级及以上城市为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 370-376. (WEI Xiaojian, Zhao Li, CHENG Penggen, et al. Research on the spatial dynamics of land use and ecological service value in china -taking prefecture-level cities and beyond as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 370-376. (in Chinese))

[18] 李建蓉, 乔庆华, 桑会勇, 等. 土地利用与生态系统服务价值演变及其关联性[J]. 测绘科学, 2021, 46(12): 179-185. (LI Jianrong, QIAO Qinghua, SANG Huiyong, et al. The evolution and correlation of land use and ecosystem service value[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(12): 179-185. (in Chinese))

[19] 熊文, 孙晓玉, 彭开达, 等. 汉江下游平原典型区域水生态系统服务价值评价[J]. 人民长江, 2020, 51(8): 71-77. (XIONG Wen, SUN Xiaoyu, PENG Kaida, et al. Evaluation of water ecosystem service value in typical plain area of lower Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2020, 51(8): 71-77. (in Chinese))

[20] 黄傅强, 王志远, 刘慧, 等. 基于生态系统服务价值的城市增长边界划定研究: 以衡阳市中心城区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1115-1125. (HUANG Fuqiang, WANG Zhiyuan, LIU Hui, et al. Delimitation of urban growth boundaries based on ecosystem service value: A case study of Hengyang central area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(9): 1115-1125. (in Chinese))

[21] 刘耕源, 杨青, 黄俊勇. 黄河流域近十五年生态系统服务价值变化特征及影响因素研究[J]. 中国环境管理, 2020, 12(3): 90-97. (LIU Gengyuan, YANG Qing, HUANG Junyong, The change characteristics and influence factors of ecosystem services valuation of the Yellow River Basin from 2000 to 2015[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(3): 90-97. (in Chinese))

[22] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域"自然-社会"二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))

[23] WANG H, Qin D, WANG J, et al. State identification and multiple regulation of regional water resources shortage [J]. Resources Science, 2003(6): 2-7.

[24] 王浩, 王芳, 严登华, 等. 中华水塔面临的挑战与应对战略[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(6): 485-491. (WANG Hao, WANG Fang, YAN Denghua, et al. Challenges and coping strategies

of China's Water Tower[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(6): 485-491. (in Chinese))

[25] 柳长顺，王建华，蒋云钟，等. 河湖幸福指数——富民之河评价研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2021，19(5)：441-448.（LIU Changshun, WANG Jianhua, JIANG Yunzhong, et al. River happiness index: The evaluation system of river to enriching the people[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(5): 441-448. (in Chinese))

[26] 谢高地，张彩霞，张雷明，等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报，2015，30(8)：1243-1254.（Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254. (in Chinese))

[27] 陈万旭，李江风，朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. 自然资源学报，2019，34(2)：325-337.（CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, ZHU Lijun, Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 325-337. (in Chinese))

[28] COSTANZA R, De GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions, 2014, 26: 152-158.

[29] 李新萍，杜文涛，吴煜，等. 河南省土地利用结构时空偏移及生态系统服务价值时空分异特征研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2023，54(1)：138-150.（LI Xinping, DU Wentao, WU Yu, et al. Spatialand temporal shift in land use structureand and spatio-temporal variation in ecosystem services value in Henan Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 138-150. (in Chinese))

[30] 桑学锋，王浩，王建华，等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I)：模型原理与构建[J]. 水利学报，2018，49(12)：1451-1459.（SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water Resources Comprehensive Allocation and Simulation Model(WAS), part I. Theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 1451-1459. (in Chinese))

[31] 桑学锋，赵勇，翟正丽，等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(II)：应用[J]. 水利学报，2019，50(2)：201-208.（SANG Xuefeng, ZHAO Yong, ZHAI Zhengli, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model(WAS), part II. Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 201-208. (in Chinese))

[32] CHANG H, SANG X, HE G, et al. A socio-hydrological unit division and confluence relationship generation method for human-water systems[J]. Water, 2022(14): 207413.

[33] XIE G, ZHANG C, ZHEN L, et al. Dynamic changes in the value of china's ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2017(26): 146-154.

[34] 刘永强，廖柳文，龙花楼，等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例[J]. 地理研究，2015，34(4)：691-700.（LIU Yongqiang, LIAO Liuwen, LONG Hualou, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan province[J]. Geographical Research, 2015, 34(4): 691-700. (in Chinese))

[35] LIU Y, Li J, ZHANG H. An ecosystem service valuation of land use change in Taiyuan city, China[J]. Ecological Modelling, 2012, 225: 127-132.

[36] LI Y, ZHAN J, LIU Y, et al. Response of ecosystem services to land use and cover change: a case study in Chengdu city[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 132: 291-300.

[37] NEILSON R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water-balance[J]. Ecological Applications, 1995, 5(2): 362-385.

[38] FRANKLIN J, SERRA-DIAZ J M, SYPHARD A D, et al. Global change and terrestrial plant community dynamics[J]. Proceedings of The National Academy Of Sciences of The United States of America, 2016, 113(14): 3725-3734.

[39] YAN Z, ZHOU Z, SANG X, et al. Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model[J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1152-1165.

[40] YAN Z, ZHOU Z, LIU J, et al. Multi-objective optimal operation of reservoirs based on water supply, power

generation, and river ecosystem with a new water resource allocation model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(12): 5020024.

[41] LIU Z, SANG X, ZHENG Y, et al. Virtuous cycle: an idea of water resources management and top-level planning[J]. Water, 2022(14): 173811.

[42] ZHENG Y, SANG X, LIU Z, et al. Water allocation management under scarcity: a bankruptcy approach[J]. Water Resources Management, 2022, 36(9): 2891-2912.

Services value evaluation of water cycle and ecosystem in the Yangtze River Basin

ZHENG Yang, YU Fuliang, SANG Xuefeng, ZHANG Siqi, LI Ziheng

(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: To address the complexity of evaluating the Ecosystem Services Value (ESV) under human activities, this paper couples the ESV evaluation system with an improved Water Allocation and Simulation Model (WAS) to quantify and identify the supporting role of the "nature-society" dual water cycle in regional ecosystem functions, and proposes an evaluation method for the the Ecological Service Value of Water (ESV-W). Applying this method to the evaluation of the ESV and the ESV-W of the Yangtze River Basin from 2005 to 2020. The results show that the ESV of the Yangtze River Basin increased from 31.04 trillion yuan to 42.08 trillion yuan from 2005 to 2020, with high-value areas concentrated in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Two Lakes regions. In terms of the ESV-W, the unit benefit increased from 19.20 yuan/m^3 to 24.98 yuan/m^3, among which the contribution of agricultural irrigation, ecological replenishment, and natural water cycle in 2020 were 8.21 yuan/m^3, 194.93 yuan/m^3, and 43.13 yuan/m^3, respectively. This study provides a scientific reference for improving the evaluation system of Ecosystem Service Value and the optimization management of water resources.

Key Words: ecosystem services value; water cycle system; WAS model; ecological benefits; Yangyze River Basin

(责任编辑：祁　伟)

(上接第 221 页)

Research on ridge-estimation based autoregressive model in real-time flood forecasting

LIU Kexin[1], XU Haiqing[1], PANG Lili[2], GUO Yi[1], LI Kuang[1], LIANG Lili[3]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Richway (Beijing) Technology Co. Ltd, Beijing* 100097, *China*;
3. *Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: In order to improve the accuracy of real-time flood forecasting, hydrological model and error correction model are often combined. Autoregressive (AR) model is widely used in real-time flood forecasting to update forecasting flow because of its simple structure. However, some applications show that the results of AR model are often unstable, showing too large flow corrections or even oscillations, which seriously affects its performance. In view of this, this paper makes an explanation for the instability of AR model from the perspective of matrix eigenvalue, and then introduces ridge estimation method to update the autoregressive coefficient by using selective flow information to make it more meet the process of the real flow, and this enhances the robustness of AR model. The results show that the ridge estimation method significantly improves the robustness of AR model, and thus further improves the accuracy of flood forecasting.

Keywords: AR model; ridge estimation; flood forecasting; stability; error correction

(责任编辑：王学凤)