

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222002

我国生态系统服务与水土资源匹配的 时空动态及耦合协调关系

黄世涛¹, 吴 凯², 赵文飞³

(1. 长江工程职业技术学院, 湖北 武汉 430212; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 探讨生态系统服务与水土资源匹配状况之间的关系对于实现生态资源可持续利用具有重要意义。为此, 运用当量因子法、水土资源匹配系数和耦合协调度模型揭示了我国生态系统服务价值、水土资源匹配状况及两者之间耦合协调关系的时空演变特征。结果表明, 2010~2018年我国生态系统服务总价值总体增加了21 444.5亿元; 地均生态系统服务价值整体呈南高北低的空间格局, 且除上海市外的所有省份均得到了提升。我国水土资源匹配系数持续减小, 在空间上大致以青海省为端点呈现顺时针先减小后增大的变化特征。2010~2018年我国生态系统服务与水土资源匹配之间的耦合协调度先增后减, 整体属于基本协调类型, 处于转型期, 呈现南高北低的空间分布特征。研究结果可为我国协调生态保护与水土资源利用的政策制定提供决策依据。

关键词: 生态系统服务; 水土资源; 耦合协调; 时空演变; 中国

中图分类号: TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0081-04

1 引言

将生态系统服务与水土资源利用两者耦合协调关系的科学信息纳入决策管理对于区域可持续发展意义重大。目前, 关于针对生态系统服务和水土资源利用的研究在各自的研究理论、方法及应用等领域均取得了丰硕成果, 但现有研究多停留于对生态系统服务或水土资源的单方面分析, 较少考虑两者之间的相互耦合关系, 不利于同步实现生态系统服务可持续供给和水土资源优化配置。鉴于此, 本文综合运用当量因子法和水土资源匹配系数分析我国生态系统服务价值和水土资源匹配状况的时空演变特征, 并结合耦合协调度模型进一步揭示两者之间的关系, 以期补充两者之间耦合关系的知识信息, 并为协调我国生态管理和水土资源开发利用提供参考。

2 数据与方法

2.1 基础数据

以我国30个省份(不含港澳台和西藏)为研

究区, 选取2010、2015、2018年为研究期, 其中水资源数据来源于相关年份的《中国水资源公报》, 粮食生产数据来源于相关年份的《中国粮食和物资储备年鉴》, 相关年份的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 空间分辨率为1 000 m。

2.2 生态系统服务价值测算方法

采用谢高地等^[1]提出的当量因子法测算我国的生态系统服务价值。一般来说, 单位生态系统服务价值当量因子的经济价值为当年全国平均粮食单产市场价值的 $1/7^{[1,2]}$, 其计算公式为:

$$e = \frac{1}{7} \sum_{c=1} (p_c q_c s_c) / \sum_{c=1} s_c \quad (1)$$

式中, e 为单位生态系统服务价值当量因子的经济价值, 元/ km^2 ; c 为粮食作物类别, 即稻谷、玉米、小麦、大豆; p_c 为 c 类粮食作物的市场价格, 元/ kg ; q_c 为 c 类粮食作物的单产, kg/km^2 ; s_c 为 c 类粮食作物的种植面积, km^2 。

进而计算生态系统服务单位面积的价值系数, 计算公式为:

$$V_{vc_{jk}} = eq_{jk} \quad (2)$$

收稿日期: 2022-09-27, 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009092); 2019年度湖北省职业技术教育学会科学研究重点课题(ZJGA201945)

作者简介: 黄世涛(1983-), 男, 副教授, 研究方向为水利水电, E-mail: hstwater@163.com

式中, $V_{vc_{jk}}$ 为用地类型 k 提供的第 j 项生态系统服务的单位面积价值系数, 元/ km^2 ; q_{jk} 为用地类型 k 提供的第 j 项生态系统服务的当量因子, 无量纲。

我国各省份的生态系统服务价值计算公式为:

$$E_{\text{ESV}_i} = \sum_{j=1}^m E_{\text{ESV}_{ij}} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n A_{ik} V_{vc_{jk}} \quad (3)$$

式中, E_{ESV_i} 为我国第 i 个省份的生态系统服务总价值, 元; $E_{\text{ESV}_{ij}}$ 为我国第 i 个省份第 j 项生态系统服务的价值, 元; A_{ik} 为第 i 个省份用地类型 k 的面积, km^2 。

鉴于我国各省份国土面积之间的差异, 为保证各省份生态系统服务价值之间具有可比性, 采用各省份的地均生态系统服务价值用于相关分析。

2.3 水土资源匹配系数测算方法

采用水土资源匹配系数分析我国水土资源匹配状况, 以揭示我国各省份水资源与土地资源时空分配的均衡状况和满足程度。公式为:

$$R_i = W_i \delta_i / S_i \quad (4)$$

式中, R_i 为第 i 个省份的水土资源匹配系数, $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; W_i 为第 i 个省份的水资源可利用量, 10^8 m^3 ; δ_i 为第 i 个省份的农业用水量占总用水量的比重, %; S_i 为第 i 个省份的耕地资源数量, 10^4 hm^2 。

2.4 耦合协调度测算模型

采用耦合协调度模型测算了我国生态系统服务与水土资源匹配状况的协调程度。公式为:

$$D = \sqrt{CT} \quad (5)$$

$$C = [2E_{\text{ESV}}R / (E_{\text{ESV}} + R)^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$T = aE_{\text{ESV}} + bR \quad (7)$$

式中, D 为生态系统服务价值与水土资源匹配状况之间的耦合协调度, 取值在 $0 \sim 1$ 之间, 值越大表明两者越趋于协调发展; C 为我国生态系统服务与水土资源匹配状况之间的耦合度; T 为我国

生态系统服务与水土资源匹配状况的综合评价水平; E_{ESV} 、 R 分别为 max-min 标准化后的地均生态系统服务价值和水土资源匹配系数; a 、 b 均为权重值, 考虑到在管理实践中生态系统服务供给能力的改善和水土资源的可持续利用对于系统的整体协调发展来说同等重要, 因此两者取值均为 0.5 。参考现有研究成果^[3], 将耦合协调度结果划分为 3 个发展阶段和 5 种协调类型(表 1)。

表 1 耦合协调发展阶段和类型划分

Tab. 1 Division of development stage and type for coupling coordination

发展阶段	类型	耦合协调度 D
不协调发展	严重失调	$0 \leq D \leq 0.2$
	中度失调	$0.2 < D \leq 0.4$
转型期	基本协调	$0.4 < D \leq 0.6$
协调发展	中度协调	$0.6 < D \leq 0.8$
	高度协调	$0.8 < D \leq 1$

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值的时空演变

3.1.1 时序变化

由土地利用类型生态系统服务价值及变化(表 2)可知: ①从我国生态系统服务总价值的变化来看, 2010~2018 年我国生态系统服务总价值表现为先增后减的变化趋势, 整个研究期内总体增加了 21 444.5 亿元, 增加率为 12.1%。②从各种土地利用类型生态系统服务价值的变化来看, 2010~2018 年所有土地利用类型的生态系统服务价值同样存在先增后减的变化特征。其中, 2010~2018 年林地的生态系统服务价值增加最明显, 占同期总价值增加量的 53.1%; 而 2015~2018 年, 林地和草地的变化量最大, 总共减少了 9 908.5 亿元, 占同期减少量的 72.6%。此外, 我国各种土地利用类型所提供的生态系统服务价值历年排序均为林地 > 草地 > 耕地 > 水

表 2 我国不同土地利用类型生态系统服务价值及变化

Tab. 2 Ecosystem service value and change of different land use types in China

年份	耕地		林地		草地		水体		建设用地		未利用地		总价值 /亿元
	面积 / km^2	价值 /亿元	面积 / km^2	价值 /亿元	面积 / km^2	价值 /亿元	面积 / km^2	价值 /亿元	面积 / km^2	价值 /亿元	面积 / km^2	价值 /亿元	
2010 年	1 768 419.0	22 659.4	2 085 379.0	95 112.3	2 149 810.0	40 691.8	207 723.0	15 279.1	190 930.0	0	1 811 617.0	4 084.3	177 827.0
2015 年	1 766 545.0	27 144.4	2 079 498.0	113 737.2	2 141 931.0	48 618.9	210 358.0	18 555.2	213 895.0	0	180 1651.0	4 871.0	212 926.7
2018 年	1 763 557.0	25 639.9	2 077 122.0	107 492.1	2 093 213.0	44 955.6	197 992.0	16 524.3	260 438.0	0	1 821 556.0	4 659.7	19 9271.5
2010~2015 年变化量	-1 874.0	4 485.0	-5 881.0	18 624.9	-7 879.0	7 927.1	2 635.0	3 276.0	22 965.0	0	-9 966.0	786.7	35 099.7
2015~2018 年变化量	-2 988.0	-1 504.6	-2 376.0	-6 245.2	-48 718.0	-3 663.3	-12 366.0	-2 030.8	4 6543.0	0	19 905.0	-211.3	-13 655.2
2010~2018 年变化量	-4 862.0	2 980.4	-8 257.0	12 379.8	-56 597.0	4 263.7	-9 731.0	1 245.2	69 508.0	0	9 939.0	575.4	21 444.5

体>未利用地>建设用地,这一方面与林地面积较大有关,另一方面也表明了林地 在维持我国生态系统稳定性方面占有举足轻重的地位。

3.1.2 空间演变

由我国地均生态系统服务价值的空间分布及变化(图 1,基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图无修改)可知,我国地均生态系统服务价值整体呈南高北低的空间变化格局,较高的省份主要位于我国长江以南地区,而较低的省份则主要位于长江以北地区,特别是在我国西北地区的省份,这种空间分布格局的形成可能与我国南北方地区自然地理条件和土地利用方式的显著差异有关。从我国各省份地均生态系统服务价值的变化来看,研究期内除上海市外,其他所有省份的地均生态系统服务价值均有所增长,其中辽宁省增加最为明显,其次为我国南方地区省份,这也在一定程度上反映了我国的生态建设成效显著。

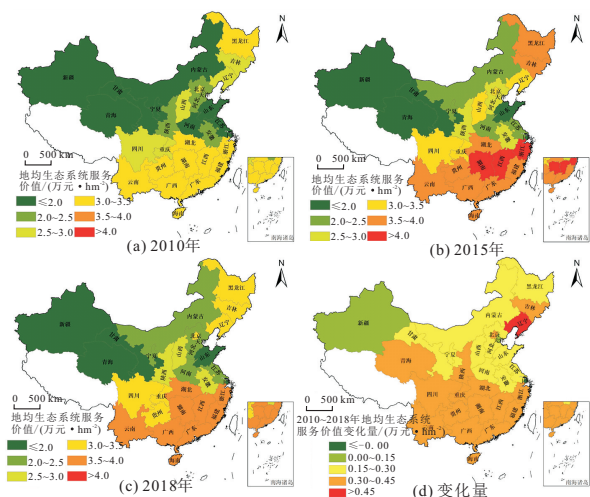


图 1 我国地均生态系统服务价值的空间分布及变化

Fig. 1 Spatial distribution and change of ecosystem service value per unit area in China

3.2 水土资源匹配状况的变化特征

3.2.1 时序变化

利用水土资源匹配系数的频率分布来表征 2010~2018 年我国水土资源匹配状况的时序变化特征(表 3)。可以看出,2010~2018 年间,我国水土资源匹配系数介于 $0.627 \times 10^4 \sim 120.734 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,说明我国各省份间水土资源匹配状况存在显著差异;极差由 2010 年的 $94.305 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 减小至 2015 年的 $77.104 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,而后又增加至 2018 年的 $119.757 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,各省份间水土资源匹配状况的差距先缩小后扩大;我国水土资源匹配系数均值由

表 3 我国水土资源匹配系数的变化情况

Tab. 3 Changes of matching coefficient of water and land resources in China

年份	最大值	最小值	极差	平均值*	标准差	峰度系数	偏度系数
2010 年	94.953	0.649	94.305	1.192	21.444	4.510	2.010
2015 年	77.731	0.627	77.104	1.128	17.791	3.576	1.783
2018 年	120.734	0.977	119.757	1.040	22.605	15.434	3.549

注: * 表示该值由全国层面的数据计算所得;除峰度系数、偏度系数无单位外,其他数据单位均为 $10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

2010 年的 $1.192 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 持续减小至 2018 年的 $1.040 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,表明我国水土资源匹配状况在恶化。从数据内部变化来看,标准差先减小后增加,且远大于平均值,说明我国各省份的水土资源匹配状况与全国均值的离散程度较大且处于波动变化趋势;3 个年份的峰度系数和偏度系数均先减小后变大,表明样本数据较正态分布表现为尖峰分布且向右偏移,拥有较高水土资源匹配系数的省份数量先由多变少而后有所增加。

3.2.2 空间演变

2010~2018 年我国水土资源匹配系数的空间分布及变化情况见图 2。可以发现 2010、2015、2018 年 3 个年份我国水土资源匹配状况的空间分布格局比较相似,大致以我国青海省为端点呈现出顺时针先减小后增大的空间变化特征。水土资源匹配系数较低的省份主要在青海的东北方向呈集中连片分布,水土资源匹配状况较好的省份主要包括青海省及其东南方向上的省份。从水土资源匹配系数的时间变化来看,2010~2018 年我国青海省的水土资源匹配状况明显改善,而福建、江西呈显著恶化,此外水土资源匹配状况出现恶化的省份还有浙江、海南、湖南、新疆、辽宁、湖北、

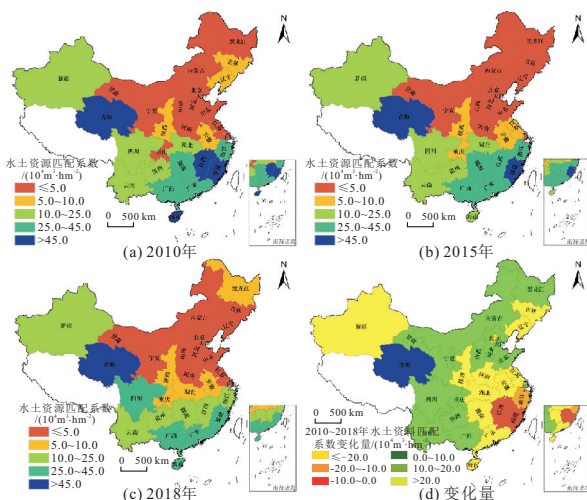


图 2 我国水土资源匹配系数的空间分布及变化

Fig. 2 Spatial distribution and change of matching coefficient of water and land resources in China

陕西、河南、北京、安徽、吉林、广东和江苏等省份，未来需进一步采取措施以改善水土资源匹配状况，实现水土资源可持续利用。

3.3 生态系统服务与水土资源匹配状况的耦合协调分析

3.3.1 耦合协调度的时序变化

表 4 为 2010~2018 年我国生态系统服务与水土资源匹配之间耦合协调度的变化情况。可以看出，我国生态系统服务与水土资源匹配之间的耦合协调度在整个研究期介于 0.110~0.872 之间，极差呈持续减少趋势，说明我国各省份间生态系统服务与水土资源匹配耦合协调度的差距在减小；全国各省份的耦合协调度均值表现为增—减变化，数值介于 0.430~0.492 之间，表明我国生态系统服务与水土资源匹配之间的关系整体属于基本协调类型，处于由不协调发展向协调发展演变的转型期。

表 4 耦合协调度的变化情况

Tab. 4 Changes of coupling coordination degree

年份	最大值	最小值	极差	平均值	协调类型	发展阶段
2010 年	0.872	0.181	0.691	0.483	基本协调	转型期
2015 年	0.862	0.219	0.643	0.492	基本协调	转型期
2018 年	0.735	0.110	0.625	0.430	基本协调	转型期

3.3.2 耦合协调类型的空间演变

图 3 为我国生态系统服务与水土资源匹配之间的耦合协调类型的空间分布及变化。由图 3 可知，耦合协调关系存在明显空间分异规律，且 2010、2015、2018 年 3 个年份的耦合协调度在分布上存在相似的空间格局，整体呈南高北低的空间分布特征。具体来说，耦合协调度较高的省份

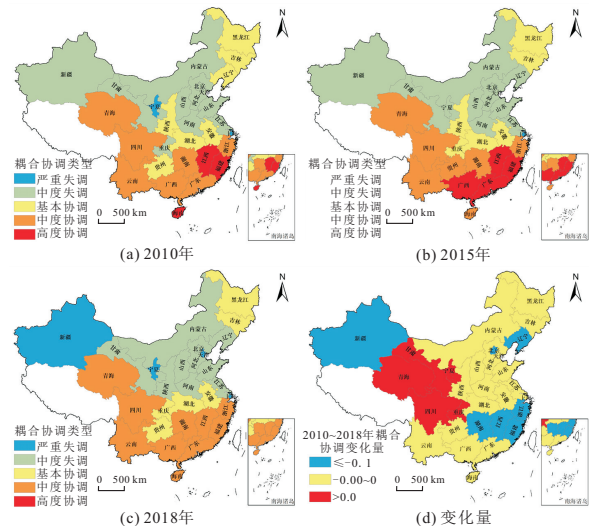


图 3 我国耦合协调类型的空间分布及变化

Fig. 3 Spatial distribution and changes of coupling coordination types in China

主要位于我国东南和西南地区，而耦合协调度较低的省份则主要在我国西北和华北地区。截至 2018 年，新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、内蒙古、辽宁、北京、天津、河北、河南、山东、江苏和上海等 14 个省市生态系统服务与水土资源匹配状况之间的耦合协调关系处于不协调发展阶段，其中新疆、宁夏、天津和上海 4 个省市的耦合协调类型属于严重失调，而其他 10 个省市属于中度失调，在这些省市可以因地制宜的制定相关政策以加强对水土资源和生态环境的同步治理和协同保护。从各省市耦合协调度的时间变化来说，2010~2018 年，除甘肃、宁夏、青海、四川和重庆这 5 个省市生态系统服务与水土资源匹配状况之间的耦合协调度有所增加外，其他省市均出现了恶化现象，其中以新疆、北京、辽宁、湖南、江西、浙江和福建等省市的恶化情况较为严重，这些省市应警惕其生态系统服务与水土资源匹配状况之间耦合协调关系今后可能会进一步恶化的风险，需采取措施以改善生态保护与水土资源开发利用之间的互馈关系。

4 结论

a. 2010~2018 年我国生态系统服务总价值先增加后减少，整体增加了 21 444.5 亿元；我国地均生态系统服务价值整体呈南高北低的空间格局，且在研究期内除上海市外，其他所有省份的价值均有所增加。

b. 2010~2018 年我国水土资源匹配状况呈现持续恶化趋势，在空间上大致以青海省为端点呈现顺时针先减小后增大的变化特征。

c. 2010~2018 年我国生态系统服务与水土资源匹配之间的耦合协调度先增后减，整体属于基本协调类型，处于由不协调向协调发展的转型期，在空间上整体呈现南高北低的分布格局。

参考文献:

[1] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23 (5): 911-919.

[2] HE S, WANG D, ZHAO P, et al. Quantification of basin-scale multiple ecosystem services in ecologically fragile areas[J]. Catena, 2021, 202: 105247.

[3] 刘海龙,唐飞,丁娅楠,等. 山西省县域高质量发展与生态系统服务耦合的时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2002, 39(4): 1234-1245.

输沙量,短暂较大流量级的输沙量要小于代表性流量的输沙量,计算过程中就避免了大流量的影响。

综上所述,两种方法所计算出的造床流量较接近且整体数值差距较小,说明两种方法计算的造床流量可相互印证,此外,马卡维耶夫法在计算造床流量时将影响流量的因素考虑在内,所计算的造床流量可视为河道冲淤演变的“代表性流量”。因此,地貌功图解法相比马卡维耶夫法计算造床流量更简便、准确。

4 结论

a. 地貌功图解法计算的结果与马卡维耶夫法的结果相近,且地貌功图解法参数较少。证明在黄河下游河段计算造床流量,地貌功图解法相比于马卡维耶夫法更简便。

b. 本文计算造床流量级划分方式较单一,且仅选取黄河下游为研究河段,计算结果不够全面。因此,未来可采用多流量级多河道方法进一步验证地貌功图解法的简便性。

参考文献:

- [1] GOODWIN P. Analytical solutions for estimating effective discharge[J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 130(8): 729-738.
- [2] WOLMAN M G, MILLER J P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes[J]. Journal of geology, 1960, 68(2): 54-74.
- [3] 来志强, 赵连军, 江恩慧, 等. 基于滑动分析法的黄河下游造床流量变化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9): 2396-2404.
- [4] 孙东坡, 王勤香, 王鹏涛, 等. 基于水沙关系系数法确定黄河下游造床流量[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 150-155.
- [5] 陈建国, 胡春宏, 董占地, 等. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 10-16.
- [6] Н И 马卡维耶夫, 麦乔威. 造床流量[J]. 泥沙研究, 1957(2): 40-43.
- [7] 孙昭华, 周炜兴, 周坤, 等. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 521-534.

Analysis of Calculation Method of Bed-forming Flow in the Lower Reaches of the Yellow River

DUAN Hai-lang^{1a,1b}, LU Qin², WANG Zhi-guo^{1a,1b}, YANG Dao-ming^{1a,1b}, LI Xin-yao^{1a,1b}
(1a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; 1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the cumbersome problem of applying the Markaviev method to calculate the bed-forming flow rate, the geomorphic work diagram method was proposed to simplify the calculation of the bed-forming flow. Based on the measured water and sediment data from 1960 to 2014 at the four hydrological stations of Huayuankou, Gaocun, Aishan and Lijin in the lower reaches of the Yellow River, the Markaviev method and the geomorphological method were used to calculate the bed-forming flow of the four stations over the years. The results show that the differences in the bed-forming flow over the years at the four stations in the lower reaches of the Yellow River calculated by the two methods are small and the downward trend is similar. Compared with the Markaviev method, the geomorphic work diagram method is more convenient and accurate to calculate the bed-forming flow.

Key words: the lower reaches of the Yellow River; bed-forming flow; Markaviev method; graphic method of geomorphology

(上接第 84 页)

Spatio-temporal Dynamics and Coupling Coordination Relationship Between Ecosystem Services and Matching of Water and Land Resources in China

HUANG Shi-tao¹, WU Kai², ZHAO Wen-fei³

(1. Changjiang Institute of Technology, Wuhan 430212, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang, Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: It is of great significance to discuss the relationship between ecosystem services and matching status of water and land resources for the sustainable utilization of ecological resources. Therefore, the equivalence factor method, matching coefficient of water and land resources, and coupling coordination degree model were used to reveal the spatio-temporal evolution characteristics of the ecosystem service value, matching status of water and land resources, as well as the coupled coordination relationship between them in China. The results show that the total value of ecosystem services in China increased 2144.45 billion yuan. The overall spatial pattern of the ecosystem service value per unit area was high in the south China and low in the north China, and the ecosystem service value per unit area in all provinces except Shanghai was improved during the study period. The matching coefficient of water and land resources in China continued to decrease, showing a clockwise spatial variation characteristic of first decreasing and then increasing roughly with Qinghai province as the endpoint in space. The coupling coordination degree between ecosystem services and matching of water and land resources in China from 2010 to 2018 first increased and then decreased, and the overall belonged to the basic coordination type, which was in transition. The coupling coordination degree shows the spatial distribution characteristics of high in the south China and low in the north China. The results can provide decision-making basis for the policy formulation of coordinating ecological protection and water and land resources utilization.

Key words: ecosystem service; water and land resources; coupling coordination; spatio-temporal evolution; China