中国陆地生态系统服务净价值评估

曹世雄^{1*}, 刘玉洁², 苏蔚², 郑鑫怡², 余中洪²

1. 中央民族大学经济学院, 北京 100081;

2. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

* E-mail: shixiongcao@126.com

收稿日期: 2017-04-28; 收修改稿日期: 2017-08-17; 接受日期: 2017-11-13; 网络版发表日期: 2018-01-18

国家自然科学基金项目(批准号: 41641002)资助

摘要 生态环境保护是维护生态系统健康、改善生态系统服务功能、增加人类社会福祉的有效途径。然而, 生态系统服务价值(VES)的获得必然会产生成本投入, 传统的生态系统服务价值评估方法忽略了相关成本分析, 给土地规划造成了混乱, 不利于环境保护和社会经济的可持续发展。为了认知生态系统服务价值和净价值(NES)的差异, 改进生态系统服务评价方法, 该研究在生态系统服务价值研究的基础上, 评估了1952年以来中国大陆主要生态系统(包括农田、草地、林地和湿地)服务净价值及其变化。结果表明, 中国陆地生态系统年均服务净价值为 10.0×10^3 元/公顷, 为服务价值的35.1%, 草地生态系统服务净价值最低, 为 -0.7×10^3 元/公顷; 中国大陆农田、草地、林地和湿地2014年实现生态系统服务净价值 7.2×10^{12} 元, 是全国国民净收益(居民可支配收入与政府收入的总和) 25.6×10^{12} 元的27.0%。1952年以来, 由于人口增加的持续压力和环境政策的原因, 中国陆地生态系统服务价值和净价值持续减少; 1998年以后, 中国政府陆续实施了一系列森林保护政策, 中国陆地生态系统服务价值和净价值止跌回稳。但相关政策忽略了林地以外其他生态系统的保护, 导致农田、湿地和草地等生态系统严重退化。由于社会经济条件、资源禀赋差异, 不同地区之间的生态服务价值和净价值差异显著。为了维护生态平衡, 生态修复(尤其是人工生态修复)和社会经济发展都应该注重成本效益问题, 通过不同措施的成本收益比较, 最大限度地降低生态保护项目的成本, 增加环境保护项目的收益, 这是修复生态学需要面对的重要科学问题。

关键词 生态服务, 成本分析, 环境保护, 土地管理, 生态修复

1 引言

生态系统不仅为人类提供直接的生产和生活资料, 还为人类提供各种间接的服务, 其变化与人类的福祉密切相关(戴君虎等, 2012; 谢高地等, 2015; Costanza等, 1997)。但是, 随着社会发展, 人类的一系列活动严重影响了生态系统的结构和功能, 降低了生态系

统服务价值, 威胁到人类社会经济的可持续发展(Dobson等, 1997; Lamb等, 2005)。相关研究结果表明, 工业化以来, 全球范围内生态系统的服务价值下降了63%(Birch等, 2010)。服务价值的减少必然会影响人类未来福利, 对生活在贫困线以下、依靠自然资源生存的大约11亿居民的影响尤为严重(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。近年来, 人们逐渐意识到生态环境

中文引用格式: 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中洪. 2018. 中国陆地生态系统服务净价值评估. 中国科学: 地球科学, 48: 331–339, doi: 10.1360/N072017-00144

英文引用格式: Cao S X, Liu Y J, Su W, Zheng X Y, Yu Z Q. 2018. The net ecosystem services value in mainland China. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9153-4>

保护的重要性, 积极实施有效措施, 以期增加生物多样性、保护和修复生态环境(潘耀忠等, 2004; Bullock等, 2011年). 然而, 现有环境保护与生态修复投入远低于实际需求, 环境退化(特别是环境污染)呈加重态势(刘世荣等, 2015; 吴绍洪等, 2016).

生态修复的成本是巨大的, 典型生态修复项目每公顷的成本为100~1000美元不等(TEEB, 2009). 同时, 项目修复的收益与生态系统类型、生态系统退化程度以及修复方法密切相关(Naidoo和Ricketts, 2006). 然而, 这一重要的科学问题尚未引起学术界的足够重视. TEEB(2009)研究发现, 在2000多篇关于生态修复的文章中, 没有一项研究结果对已结项或者已成功项目的成本收益进行详细分析. 为了完善这方面的研究, Benayas等(2009)对全球89个生态修复项目进行评估, 发现多种类型的生态系统修复后, 生物多样性平均增加了44%, 生态系统提供的服务价值增加了25%, 与未受人类干扰的自然生态系统相比, 这一价值仍处于较低水平.

自从Costanza等(1997)计算了全球生态系统的服务价值以来, 生态系统服务价值评估成为生态学和经济研究的热点(Dai等, 2016; Bateman等, 2013; He等, 2013). 然而, 多数学者在开展生态系统服务价值(VES)估算时忽略了生态系统提供服务所需要的成本(曹世雄等, 2016), 或者仅仅计算了部分成本(杨志新等, 2007, 2014). 忽略成本分析(或者成本分析不全面)计算出的生态系统服务价值必然会夸大自然和人工生态系统的服务功能以及维护和恢复生态系统相关措施的经济意义, 影响土地规划的科学性和可行性(Birch等, 2010; Nelson等, 2009; Kareiva等, 2011). 如何甄别环保项目的净收益十分重要(Goldstein等, 2008), 它有助于管理者了解生态项目的一系列潜在成本与收益及其形成的原因, 从而提高环境保护项目的效益(Chen等, 2009).

在保护项目实施前, 必须对其进行成本收益分析, 以避免资金浪费、环境破坏以及威胁项目区居民的生计, 只有这样才能同时实现保护生态环境和促进区域社会经济的双赢目标(曹世雄等, 2016). 为了实现这一目的, 该研究在生态系统服务价值研究的基础上, 利用成本收益法计算了中国 758.4×10^6 公顷的农田、林地、草地和湿地等主要陆地生态系统服务的净价值. 为了进一步认识中国不同历史时期环境保护的得

失, 反映土地利用变化对生态系统服务产出的影响, 更清楚地认识环境保护的经济学意义, 该研究对1952年以来中国大陆(不包括港、澳、台地区)主要生态系统服务净价值及其变化进行评估. 期望通过抛砖引玉, 推动生态系统服务净价值方向的研究与发展. 由于数据资源的限制, 该研究没有计算荒漠、冰川、冻土、城市等陆地生态系统的服务价值与净价值, 这一方面工作将在以后的工作中逐步完成.

2 研究方法

2.1 研究区域介绍

该研究依据中国农业区域规划, 将全国31个省(市、自治区)划分为九个区. 其中西北地区包括新疆、甘肃、宁夏; 内蒙古区即为内蒙古自治区; 黄土高原包括山西、陕西; 北方地区包括北京、天津、河北、山东、河南; 东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江; 青藏高原包括西藏、青海; 西南地区包括重庆、四川、贵州、云南; 中部地区包括湖北、湖南、江苏、上海、浙江、安徽、江西; 南方地区包括广东、广西、海南、福建.

2.2 数据来源

该研究通过中国林业统计年鉴(1953~2015)、中国农业统计年鉴(1953~2015)、中国气象灾害统计年鉴(1953~2015)、中国统计年鉴(1953~2015)以及其他相关文献(张继权等, 2007), 获得全国及各省(市、自治区)的湿地、农田、草地、林地的面积、管护费用(包括自然灾害造成的损失、生态环境管护费用等等)、生态保护投入、农业生产投入等数据. 为了避免早期统计数据不全以及不同时期贴现率影响, 相关成本统一使用最近五年平均单位面积年度投入强度进行核算. 同时, 在全国统计年鉴数据的基础上, 应用农业(1998, 2008)和林业普查公报(1972~2015)数据对统计数据进行了修正, 确保原始数据真实可靠. 为了避免不同生态工程投入强度差异对计算结果的影响, 我们统一使用每年每个省为单位的合计结果进行核算.

该研究通过国际文献系统Elsevier、Springer、Nature、Wiley以及中文知网数据库, 查找已经发表的相关文献, 分别输入各个省份名称和生态耗水、植被蒸散发量、土壤侵蚀、环境污染和农业负效应等关键

词, 获得各省(市、自治区)不同植被类型耗水量以及其他环境负效应(土壤侵蚀、环境污染和温室气体排放等)的数据. 如果出现多篇论文, 选择近期影响力较高期刊、并且计算方法说明清楚的论文数据. 最终从已发表论文中获得湿地(郭洁和李国平, 2007; 曾光等, 2010; 牛振国等, 2012; 彭益书等, 2014; 梁士楚等, 2015; 刘冬等, 2016)、农地(杨建平, 2003; 吴传明, 2004; 李春强等, 2008; 徐庆华等, 2009; 张可义, 2011; 杨志新等, 2014; 雷洪军等, 2016)、林地(Cao等, 2016)、草地(耿香玲, 2012; Chen等, 2014)的耗水量和其他环境负效应数据.

2.3 成本计算

价值的形成必然对应着成本输入, 生态系统服务价值也不例外. 在既定的条件下核算生态系统服务价值(VES)时, 相关的成本(C)也不能忽略.

$$C = C_d + C_o + C_r, \quad (1)$$

式中, C 表示总成本, 包括生态保护以及修复的直接投资(C_d)、自然资源占用“挤出效应”所导致的机会成本(C_o)以及其他外部性成本(C_r 包括植物病虫害、自然灾害、土壤侵蚀、环境污染和温室气体排放等等).

为了简化计算, 该研究将农田、湿地、草地和林地等生态系统的机会成本(C_o)定义为占用土地(C_i)、水(C_w)以及其他自然资源(C_q)在其他用途上产生的收益或者产生的价值:

$$C_o = C_i + C_w + C_q. \quad (2)$$

为了避免不同年份价格不同对投入产出的影响, 该研究的成本收益数据统一使用2014年国内市场价格, 这样可较好地避免不同年份贴现率的影响. 由于其他资源占用目前尚未获得相关数据, 本次计算时尚未计算在内.

2.4 资源价格计算

可利用资源的减少必然会导致其价格上涨(鲁晨曦等, 2016). 因此, 在既定区域内水、土地及其他资源的价格会随供给减少而上升. 该研究通过下面资源稀缺模型计算水和土地的价格:

$$V_{it} = b - a P_{it}, \quad (3)$$

式中, V_{it} 是指可利用资源(水、土地等)的价格, P_{it} 是指

第 i 省在第 t 年的人均资源禀赋, a 和 b 是曲线的拟合系数.

为了估算这些参数, 该研究根据中国南水北调工程的相关数据拟定北京市2014年的水资源价格(V_{it})为每立方米1.2元, 人均可用水量最高的西藏水资源价格为每立方米0.17元(Wang等, 2009); 通过土地资源网(<http://www.tdzyw.com/>)获得土地租赁价格, 其中北京市的土地租赁价格为每公顷14520元(<http://www.tdzyw.com/>), 西藏为每公顷4320元(<http://www.tdzyw.com/>). 对无法获得相关数据的省份, 根据各省(市、自治区)人均水和土地资源占有量, 用以上模型估算.

2.5 生态系统服务净价值计算

该研究通过国内外数据库, 获得了中国各省(市、自治区)不同类型生态系统服务价值的数据库, 并统一用2014年度的价格标准进行了换算, 避免了不同年份的贴现问题. 最终从已发表的论文(陈源泉和高旺盛, 2009; 国徽等, 2012; 刘兴元和牟月亭, 2012; 庞丙亮等, 2014; 尹小娟等, 2014; 池永宽等, 2015; 谢高地等, 2015; 曹世雄等, 2016)获得了中国陆地主要生态系统服务价值的相关数据. 根据成本效益分析法计算了1952~2014年中国湿地、农田、草地、林地(天然林和人工林)生态系统服务净价值.

$$NES = VES - C, \quad (4)$$

式中, VES 表示生态系统服务价值, C 表示总成本, NES 表示生态系统服务净价值.

3 结果分析

结果表明, 2014年中国单位面积湿地、草地、农田和林地生态系统服务价值分别为: 61.3×10^3 、 4.8×10^3 、 58.5×10^3 和 44.2×10^3 元/公顷, 减去耗水、土地租赁、生态保护和农业生产投资、其他外部性成本等费用, 中国陆地生态系统单位面积服务净价值为 10.0×10^3 元/公顷, 为生态系统服务价值的35.1%. 其中湿地、草地、农田和林地扣减成本后的净价值分别为: 39.0×10^3 、 -0.7×10^3 、 27.7×10^3 和 28.3×10^3 元/公顷, 分别比生态系统服务价值减少了36.4%、114.9%、52.7%和35.8%(表1).

2014年, 中国四大生态系统总服务价值和净价值

表1 2014年中国陆地主要生态系统服务价值和净价值

生态系统	单位	生态系统服务价值	成本				生态系统服务净价值
			水成本	土地租赁成本	直接投入	其他成本	
湿地	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	61.26	14.66	1.30	0.99	5.34	38.97
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	1301.86	311.61	27.66	21.07	113.39	828.13
草地	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	4.83	4.87	0.59	0.04	0.06	-0.72
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	1673.22	1687.10	159.80	13.19	19.26	-206.12
农田	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	58.45	15.56	8.12	0.08	7.02	27.67
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	7900.82	2103.16	1097.68	11.30	948.18	3740.50
人工林	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	45.95	10.65	0.90	19.93	0.13	14.34
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	3190.17	739.09	62.56	1383.87	8.88	995.78
天然林	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	43.20	7.47	0.74	0.05	0.15	34.79
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	6386.86	1104.40	109.59	7.95	22.24	5144.33
总计	$\times 10^3$ RMB ha ⁻¹ a ⁻¹	28.44	8.28	2.03	6.62	1.54	9.98
	$\times 10^9$ RMB a ⁻¹	20482.01	5959.53	1458.56	4766.58	1111.34	7185.99

分别为 20.5×10^{12} 和 7.2×10^{12} 元, 分别相当于2014年国民总收入 62.8×10^{12} 元和国民净收益(居民可支配收入与政府收入的总和) 25.6×10^{12} 元的32.6%和28.1%。

不同地区生态系统服务净价值差异显著。其中东北地区单位面积土地生态系统服务净价值最高, 为 19.9×10^3 元/公顷, 高出全国平均水平99.5%; 西北地区单位面积土地生态系统服务净价值最低, 为 2.6×10^3 元/公顷, 低于全国平均水平73.4%。西北地区生态系统服务净价值总量为 238.6×10^9 元, 占全国总量的3.3%; 西南和东北地区生态系统服务净价值分别为 1863.6×10^9 元和 1647.0×10^9 元, 分别占全总量的25.9%和22.9%(表2)。

1952年以来, 中国陆地主要生态系统服务价值和净价值均呈现先降后升的变化趋势, 各个地区总的走势大体一致, 但地区之间的变化幅度差异显著。1952年, 全国生态系统服务价值为 19.7×10^{12} 元, 至1983年生态系统服务价值降至最低点 17.4×10^{12} 元, 降幅达到12%; 2014年生态系统服务价值达到最高点 21.1×10^{12} 元。同时生态系统服务净价值也呈类似趋势, 1952年为 7.74×10^{12} 元, 2014年为 6.98×10^{12} 元, 变化幅度为9%(图1)。

由于地区间社会经济条件不同、资源禀赋存在差异, 区域之间的生态服务价值和净价值变化差异显著。其中, 青藏高原地区生态系统服务价值和净价值变化

幅度最大, 服务价值由1952年的 1.18×10^{12} 元降低至1993年的 0.73×10^{12} 元, 下降幅度为38.1%; 1993年以后逐步回升, 至2014年增长至 0.87×10^{12} 元; 生态系统服务净价值从1952~2005年一直呈下降趋势, 由 0.85×10^{12} 元降至 0.41×10^{12} 元, 降幅达到52%, 2005年以后开始回升, 2014年增长至 0.44×10^{12} 元。北方农区的生态系统服务价值和净价值变化幅度最小, 1952~2014年, 价值和净价值变化幅度分别为2%和7%(图1)。

4 讨论

生态系统服务功能(包括水土保持、生物多样性保护、气体调节、水源涵养等等)与人类生活息息相关(Ouyang等, 2016; Pearce, 1997)。人类活动改变了土地利用方式, 诱发自然环境变化, 影响了生态系统服务价值的形成(Cao等, 2016)。价值的获取和成本输入是辩证的, 忽略成本投入得出的生态系统服务价值不能作为政策制定的依据(Kinzig等, 2012)。例如, 在该研究中, 草地生态系统的价值为 4.8×10^3 元/公顷, 扣除成本后的净价值却为负值, 这主要是因为过度放牧造成草地承载力下降(中国农业统计年鉴, 1978~2015; 中国畜牧兽医年鉴, 2015), 导致草地生态系统服务功能衰竭、同时维护草地生态系统正常状态所需的成本费用上升。如果仅仅根据生态系统服务价值计算结果制

表 2 各地区生态系统服务价值和净价值对比分析

区域	单位	价值	成本				净价值
			水成本	土地租赁成本	直接投入	其他成本	
西北	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	13.54	7.69	1.55	0.86	0.79	2.65
	$\times 10^9$	1218.65	692.18	139.31	77.29	71.28	238.59
内蒙古	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	16.51	6.71	1.11	1.06	0.79	6.84
	$\times 10^9$	1639.63	666.50	109.97	105.73	78.44	679.00
黄土高原	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	29.97	10.67	2.37	4.24	2.42	10.26
	$\times 10^9$	899.55	320.31	71.28	127.41	72.62	307.92
北方	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	39.41	8.69	4.69	12.80	4.65	8.59
	$\times 10^9$	1873.43	412.99	223.03	608.26	220.98	408.17
东北	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	42.68	10.88	2.75	7.26	1.87	19.91
	$\times 10^9$	3530.52	900.19	227.58	600.72	155.01	1647.03
青藏高原	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	7.16	2.31	0.34	0.14	0.04	4.33
	$\times 10^9$	863.92	278.42	40.78	16.94	5.41	522.37
西南	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	37.06	9.81	1.95	5.87	1.33	18.10
	$\times 10^9$	3815.27	1010.22	200.83	604.09	136.52	1863.61
中部	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	42.94	10.78	3.36	15.33	3.12	10.35
	$\times 10^9$	3873.26	972.44	302.70	1382.41	281.66	934.05
南方	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	48.87	12.47	2.53	21.96	1.58	10.33
	$\times 10^9$	2767.79	706.28	143.09	1243.74	89.43	585.25
合计	$\times 10^3 \text{ ha}^{-1}$	28.44	8.28	2.03	6.62	1.54	9.98
	$\times 10^9$	20482.01	5959.53	1458.56	4766.58	1111.34	7185.99

定草地利用规划以及保护政策会与最初的目标相背离。计算结果很好地说明现有生态保护与修复投入低于实际需要的这一事实。近年来中国实施了多项林地保护工程,对草地和其他陆地生态系统的关注度有待提升。生态系统保护政策的不均衡会进一步加剧中国资源紧缺的局面。因此,在以后的生态修复规划中,不仅要准确估算项目成本,还要均衡考虑各生态系统保护的实际需要,合理开展土地规划(王大尚等, 2013)。

气候变化和人类活动均影响生态系统服务功能的发挥(Jack等, 2008),雨水充足、气候湿润以及土壤肥沃的热带地区,通常生态系统服务价值比其他地区高,但是在扣减相关成本后,生态系统服务净价值却远低于生态系统服务价值。相比之下,虽然一些地区的自然禀赋欠缺,但是生态系统服务净价值在价值中所占比例却较高。比如中国中部地区,生态系统服务净价值仅占生态系统服务价值的24%,但是自然条件相对

处于劣势的内蒙古区,虽然生态系统服务净价值仅为 679×10^9 元,低于中部地区(934×10^9 元),但是占生态系统服务价值的比重却高达41.4%(表2)。用传统的生态系统服务价值评估方法,似乎生态环境保护项目应该更侧重于资源条件优越的地区,但是净价值评估结果不尽相同,比如气候寒冷的东北和青藏高原表现不俗,表明在生态脆弱地区开展环境保护的收益率更高。生态系统服务价值和净价值评估方法差异非常显著,考虑到中国的实际环境状况,根据净价值评估方法筛选出成本最低、净收益最高的项目,根据区域特点因地制宜制定土地利用规划,均衡配置生态修复项目,是实现生态环境保护 and 经济发展双赢的最佳方案(曹世雄, 2012; Mittermeier等, 2003; Kinzig等, 2011; Costanza等, 2014)。

人类主导的土地利用变化是自然环境和整个生态系统服务供给变化的主要驱动因素之一,湿地、草

图 1 1952~2014年中国大陆生态系统服务价值(VES)与净价值(NES)变化图

地、农田、林地是人类活动最频繁的生态系统(Goldstein等, 2008). 将天然草地、森林、湿地转变为农田、人工林、以及城市, 大大增加了食品、木材、住房及人类需要的其他产品的供给, 但同时也减少了生物多样性和许多生态系统服务功能的发挥(Lawler等, 2014). 在20世纪80年代以前, 追求经济增长忽视了生态环境保护, 导致自然生态系统破坏, 陆地生态系统服务功能衰竭; 80年代以后, 中国政府逐渐意识到生态环境保护的重要性, 并且实施了一系列生态环境保护项目, 如退耕还林、天然林保护(蔡志坚等, 2015)、湿地保护(Zheng等, 2013)等, 湿地、林地等生态系统功能逐渐恢复, 各生态系统提供的服务价值也呈上升趋势(图1). 生态系统服务净价值评估结果表明, 生态脆弱区功能的发挥更容易受到政策变化的影响, 通过净价值变化的评估, 可以较好地反映政策的优劣及其对环境的影响.

科学合理的土地规划是基于长期土地净收益最大化的综合结果, 而不是追求某个单一指标(比如森林覆盖率)的最大化和短期利益最大化. 不同地区的资源禀赋差异导致其资源价格不同, 在项目实施期间, 资源的价格也会发生变化, 进一步使得生态系统服务净价值评估结果呈现不均等状态. 在制定项目规划时不仅要考虑成本问题, 价格的动态预测也是必不可少的. 在制定大范围的生态修复政策以及土地利用规划时, 要充分考虑到资源价格的地区差异. 政策制定者、科学家、土地管理者都应该充分考虑到市场变化、地区差异以及气候变化等多种因素对成本收益的影响, 积极量化各关键因素, 权衡经济效益和生态效益, 正确把握短期效益和长期效益的关系. 应用生态系统服务净价值评估方法比较环境保护项目的实际收益, 选择成本最低的方案, 实现社会和经济收益最大化. 同时, 在制定生态保护项目时, 应均衡考虑湿地、草地、农田、林地生态系统的重要性, 尤其是农田、草地生态系统的维护是中国环境保护的薄弱环节. 将生态保护的重点由林地逐步均衡到所有生态系统, 只有这样才能充分、合理利用中国的自然资源, 实现社会经济的可持续发展.

基于生态系统服务价值的核算方法(Costanza等, 1997, 2014)忽略了成本效益评估, 不能准确体现生态项目的实际效益, 给土地利用规划造成混乱. 传统的农业负效应评估虽然考虑到了水资源消耗的负效应和环

境危害(如环境污染、土壤侵蚀等)的负面影响(杨志新等, 2007, 2014), 但忽略了土地等自然资源占用“挤出效应”所导致的机会成本(耿香玲, 2012)、环境保护和农业生产投资的直接成本, 以及自然灾害造成的其他成本. 计算结果与成本收益分析有较大差距. 相对以前的生态系统服务价值和农业负效应评估方法, 生态系统服务净价值核算方法能够实现社会经济发展和生态环境保护相结合, 通过更加准确的方法计算生态系统服务净价值, 提出净收益最大化的土地利用和生态修复方案. 虽然该研究关于中国陆地生态系统的研究还很粗糙, 但是研究结果反映出的问题值得重视. 同时, 基于文献考证结果进行的生态系统服务净价值评估具有很大误差, 因此在今后的应用中, 应根据各地实际情况, 通过样地监测等实测结果进行评估, 更加准确地反映不同地区、不同项目的实际情况.

考虑到数据的可获得性以及计算的可行性, 该研究只考虑到了湿地、草地、农田、林地四种主要的陆地生态系统类型, 对于荒漠、冰川、城市等生态系统服务净价值评估将是今后研究应该不断深入探索的方向之一. 不同生态工程实施每年都有差异、每个地区也有很大不同, 因此, 围绕不同地区、不同生态工程应该有不同结果, 这些研究也是今后研究的重要方向. 同时, 该研究只考虑到了机会成本中的水和土地部分, 其他成本计算还不全面, 相关结果有待在今后研究中逐步完善. 在对某个生态区域的成本进行核算时, 可以进行野外调查研究, 并结合信息遥感技术, 获取更加精确的数据. 为了维护生态平衡, 生态修复和经济活动都应该关注成本效益问题. 生态系统服务净价值的研究结果可以为土地管理者、政策制定者设计出更加有效的策略, 为环境保护和社会经济发展提供理论基础, 该方法的成熟与应用将对中国社会经济可持续发展产生深远影响.

参考文献

- 曹世雄. 2012. 生态修复项目对自然与社会的影响. 中国人口·资源与环境, 11: 101–108
- 曹世雄, 李宇腾, 鲁晨曦. 2016. 生态系统服务净价值核算方法及其对北京市人工林项目的评估. 科学通报, 24: 2724–2729
- 蔡志坚, 蒋瞻, 杜丽永, 张玲, 杨加猛, 谢煜. 2015. 退耕还林政策的有效性与其有效政策搭配的存在性. 中国人口·资源与环境, 9: 60–69
- 池永宽, 熊康宁, 刘肇军, 王元素, 张锦华, 赵盼弟. 2015. 我国天然草

- 地生态系统服务价值评估. 生态经济, 31: 132-137
- 陈源泉, 高旺盛. 2009. 中国粮食主产区农田生态服务价值总体评价. 中国农业资源与区划, 1: 33-39
- 戴君虎, 王焕炯, 王红丽, 陈春阳. 2012. 生态系统服务价值评估理论框架与生态补偿实践. 地理科学进展, 07: 963-969
- 耿香玲. 2012. 西藏旅游发展中的负外部效应及其内化研究. 西藏大学学报(社会科学版), 27: 13-18
- 国家统计局总局. 1972~2014. 第一至八次林业普查公报. 北京: 中国统计出版社
- 国家林业总局. 1953~2015. 中国林业年鉴. 北京: 中国林业出版社
- 国家统计局总局. 1953~2015. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社
- 郭洁, 李国平. 2007. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响. 高原气象, 26: 422-428
- 国徽, 张思冲, 许瀛元, 张人月, 邢爽. 2012. 大庆湿地生态系统服务功能价值总量分析. 实验室研究与探索, 31: 28-31
- 李春强, 洪克勤, 李保国. 2008. 河北省近35年(1965~1999年)参考作物蒸散量的时空变化. 中国农业气象, 29: 414-419
- 梁士楚, 田华丽, 田丰, 夏艺, 覃盈盈. 2015. 漓江湿地植被类型及其分布特点. 广西师范大学学报(自然科学版), 33: 115-119
- 刘冬, 王涛, 沈渭春, 林乃峰, 邹长新. 2016. 近30a雅鲁藏布江流域高寒湿地动态变化及其对气候变化的响应. 生态与农村环境学报, 32: 243-251
- 刘世荣, 代力民, 温远光, 王晖. 2015. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 35: 1-7
- 刘兴元, 牟月亭. 2012. 草地生态系统服务功能及其价值评估研究进展. 草业学报, 6: 286-295
- 雷洪军, 乔姗姗, 潘红卫, 商崇菊. 2016. 贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需求指数时空分布. 农业工程学报, 32: 115-127
- 鲁晨曦, 张军泽, 赵廷阳, 曹世雄. 2016. 我国人工林生态系统的水成本核算. 自然资源学报, 31: 743-754
- 牛振国, 张海英, 王显威, 姚文博, 周德民, 赵魁义, 赵惠, 李娜娜, 黄华兵, 李丛丛, 杨军, 柳彩霞, 刘爽, 王琳, 李展, 杨镇钟, 乔飞, 郑姚闽, 陈炎磊, 盛永伟, 高小红, 朱卫红, 王文卿, 王红, 翁永玲, 庄大方, 刘纪远, 罗志才, 程晓, 郭子琪, 宫鹏. 2012. 1978~2008年中国湿地类型变化. 科学通报, 57: 1400-1411
- 农业部. 1998~2008. 第一第二次农业普查公报. 北京: 中国农业出版社
- 农业部. 1953~2015. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社
- 农业部. 2015. 中国畜牧兽医年鉴. 北京: 中国农业出版社. 22-23
- 农业部. 2014. 中国气象灾害年鉴. 北京: 中国农业出版社. 83-87
- 彭益书, 付培, 杨瑞东. 2014. 草海湿地生态系统健康评价. 地球与环境, 42: 68-81
- 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 顾晓鹤, 范一大, 李京. 2004. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 375-384
- 庞丙亮, 崔丽娟, 马牧源, 李伟. 2014. 若尔盖高寒湿地生态系统服务价值评价. 湿地科学, 12: 273-278
- 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 2013. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. 应用生态学报, 24: 1747-1753
- 吴传明. 2004. 福建省蒸发量时空分布及年际变化分析. 水利科技, (2): 3-5
- 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 高江波, 李传哲. 2016. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. 科学通报, 61: 1042-1054
- 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 2015. 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. 自然资源学报, 30: 1243-1254
- 徐庆华, 刘勇, 马履一, 王少华, 侯炳柱, 尹凤君. 2009. 东北农田黑土蒸发量与土壤水分及气象因子的关系. 东北林业大学学报, 37: 82-95
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 刘连友. 2003. 近40a中国北方降水量与蒸发量变化. 干旱区资源与环境, 17: 7-11
- 杨志新, 郑大玮, 李永贵. 2014. 北京市土壤侵蚀经济损失分析及价值估算. 水土保持学报, 18: 175-178
- 杨志新, 郑大玮, 冯圣东. 2007. 北京市农田生产的负外部效应价值评价. 中国环境科学, 27: 29-33
- 尹小娟, 宋晓谕, 蔡国英. 2014. 湿地生态系统服务估值研究进展. 冰川冻土, 3: 759-766
- 曾光, 高会军, 朱刚, 金谋顺. 2010. 近32年新疆博斯腾湖湿地动态变化及机制分析. 国土资源遥感, 86: 213-218
- 张继权, 张会, 侗志军, 宋中山, 吴晓天. 2007. 中国北方草原火灾灾情评价及等级划分. 草业学报, 16: 121-128
- 张可义. 2011. 沧州市蒸发量特性分析. 水利科技与经济, 17: 68-74
- Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B H, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Termansen M. 2013. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, 341: 45-50
- Benayas J M R, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. 2009. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. *Science*, 325: 1121-1124
- Birch J C, Newton A C, Aquino C A, Cantarello E, Echeverria C, Kitzberger T, Schiappacasse I, Garavito N T. 2010. Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 21925-21930
- Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. 2011. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. *Trends Ecol Evol*, 26: 541-549
- Cao S, Zhang J, Chen L, Zhao T. 2016. Ecosystem water imbalances created during ecological restoration by afforestation in China, and lessons for other developing countries. *J Environ Manage*, 183:

843–849

- Chen Y, Xia J, Liang S, Feng J, Fisher J B, Li X, Li X, Liu S, Ma Z, Miyata A, Mu Q, Sun L, Tang J, Wang K, Wen J, Xue Y, Yu G, Zha T, Zhang L, Zhang Q, Zhao T, Zhao L, Yuan W. 2014. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sens Environ*, 140: 279–293
- Chen Z M, Chen G Q, Chen B, Zhou J B, Yang Z F, Zhou Y. 2009. Net ecosystem services value of wetland: Environmental economic account. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 14: 2837–2843
- Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253–260
- Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob Environ Change*, 26: 152–158
- Dai E, Huang Y, Wu Z, Zhao D. 2016. Analysis of spatio-temporal features of a carbon source/sink and its relationship to climatic factors in the Inner Mongolia grassland ecosystem. *J Geogr Sci*, 26: 297–312
- Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. 1997. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277: 515–522
- Goldstein J H, Pejchar L, Daily G C. 2008. Using return-on-investment to guide restoration: A case study from Hawaii. *Conserv Lett*, 1: 236–243
- He D, Liu Y, Pan Z, An P, Wang L, Dong Z, Zhang J, Pan X, Zhao P. 2013. Climate change and its effect on reference crop evapotranspiration in central and western Inner Mongolia during 1961–2009. *Front Earth Sci*, 7: 417–428
- Jack B K, Kousky C, Sims K R E. 2008. Designing payments for ecosystem services: Lessons from previous experience with incentive-based mechanisms. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 9465–9470
- Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. 2011. *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford: Oxford University Press
- Kinzig A P, Perrings C, Chapin F S, Polasky S, Smith V K, Tilman D, Turner B L. 2012. Response—Ecosystem services: Free lunch no more. *Science*, 335: 656–657
- Kinzig A P, Perrings C, Chapin F S, Polasky S, Smith V K, Tilman D, Turner B L. 2011. Paying for ecosystem services—Promise and peril. *Science*, 334: 603–604
- Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. 2005. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310: 1628–1632
- Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. 2014. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 7492–7497
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington D C: Island Press
- Mittermeier R A, Mittermeier C G, Brooks T M, Pilgrim J D, Konstant W R, da Fonseca G A B, Kormos C. 2003. Wilderness and biodiversity conservation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100: 10309–10313
- Naidoo R, Ricketts T H. 2006. Mapping the economic costs and benefits of conservation. *PLoS Biol*, 4: e360
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Front Ecology Environ*, 7: 4–11
- Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J, Xu W, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E, Jiang L, Lu F, Wang X, Yang G, Gong S, Wu B, Zeng Y, Yang W, Daily G C. 2016. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352: 1455–1459
- Pearce D. 1997. Ecological accountancy. *Science*, 277: 1783
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2009. *Climate Issues Update*. Geneva: UNEP
- Wang Y, Xiao H, Wang R. 2009. Water scarcity and water use in economic systems in Zhangye City, Northwestern China. *Water Resour Manage*, 23: 2655–2668
- Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, Polasky S, Ma D C, Wang F C, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. 2013. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 16681–16686

(责任编辑: 陈利顶)