

基于生态足迹模型的网湖流域生态环境评价

梁胜蓝

福建师范大学地理科学学院、碳中和未来技术学院，福建 福州

收稿日期：2024年7月23日；录用日期：2024年8月19日；发布日期：2024年8月27日

摘要

网湖流域是黄石市阳新县重要的河流集水区之一。本文基于生态足迹模型对网湖流域1980年、1990年、2000年、2010年和2018年的土地类型面积、人均生态足迹、人均生态承载力、生态盈亏的演变进行了评估。结果表明：耕地面积与水域面积变化呈现此消彼长的演变特征；1980~2018年网湖流域人均生态足迹先增后减，人均生态承载力逐渐下降；1980~2018年网湖流域生态盈亏呈现“盈余-赤字-盈余-赤字”波动变化的趋势，可能表明网湖流域正在经历退化阶段。因此，在开展网湖流域生态治理和水资源利用管理工作时，需要合理规划、科学开发，确保流域生态系统的稳定和可持续发展。

关键词

网湖流域，生态足迹，生态承载力，生态盈亏

Ecological Environment Evaluation of Net Lake Watershed Based on Ecological Footprint Modeling

Shenglan Liang

School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

Received: Jul. 23rd, 2024; accepted: Aug. 19th, 2024; published: Aug. 27th, 2024

Abstract

The Net Lake watershed is one of the important river catchments in Yangxin County, Huangshi City. This paper evaluates the evolution of land type area, per capita ecological footprint, per capita ecological carrying capacity, ecological surplus and deficit of the Net Lake watershed in 1980, 1990, 2000, 2010 and 2018 based on the ecological footprint model. The results show that: the changes in

cultivated land area and watershed area show the evolution of this and that; the per capita ecological footprint of the Nettle Lake Basin increased and then decreased, and the per capita ecological carrying capacity gradually decreased from 1980 to 2018; the ecological surplus and deficit of the Nettle Lake Basin from 1980 to 2018 show the “deficit” and “surplus”. The fluctuating trend of “deficit-surplus-deficit-surplus” from 1980 to 2018 may indicate that the net lake basin is experiencing a degradation stage. Therefore, when carrying out the management of ecological management and water resources utilization in the Net Lake Basin, it is necessary to carry out rational planning and scientific development to ensure the stability and sustainable development of the basin ecosystem.

Keywords

Net Lake Basin, Ecological Footprint, Ecological Carrying Capacity, Ecological Gains and Losses

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流域人地关系系统是地球表层中人类活动与地理环境相互作用形成的复合巨系统，并且它随着人类社会的发展不断地变得深化和复杂，成了地球表层系统中最重要关系[1]。由于人地系统内要素关系具有整体性，即一个要素的变化会引起一系列要素的变化，自然因素与人为因素相互交融，因此人地系统内各亚系统之间的联系综合了自然和社会两方面因素。人类社会因素的变化速度不仅越来越快而且还向更深的方向发展，因此在研究人地关系研究演变规律时需要在动态中进行把握研究，同时还要求结合具体研究区域的实际情况和数据统计进行量化分析[2]。面对这样一个复杂的人地关系地域系统，必须充分结合经济地理学、系统学、生态学等相关学科的理论、知识与方法，对区域的水、土、矿产、气候和人口等要素进行综合集成，加强人地关系系统变化的评价和预测[3]，这是研究人地关系地域系统的重要环节。

人地关系思想有漫长的历史过程，在不同的历史文明时期，人地观念随当时的生产力水平、自然地理环境以及人类的开化程度等因素的影响而发生变化[4]。不同文明时期，人地关系思想有不同的表现：原始文明时期的天命论、农耕文明时期以孟德斯鸠为代表的环境决定论、工业文明时期以白兰氏和白吕纳为代表的可能论、后工业文明时期以罗士培为代表的协调论，再到现代生态文明时期的和谐论[5]。国外学者的人地关系研究起步较早，所关注的人地关系综合内容和研究方法的创新也较多。特别是在辩证人地关系、讨论地球环境系统以及经济发展与环境保护关系等方面，采用了包括经济学、生态学、地理信息科学等多学科研究方法[6]。国外学者的研究方法主要是以量化研究为主，构建了不同的人地关系评价模型，如环境承载力、生态足迹、生态效率等模型来具体研究不同尺度人地关系及其演变机制。Mensing 等学者对人地系统研究重点关注了土地利用/覆被(LUCC) [7]；Tan 等人关注了海岸带人地关系的脆弱性与人类活动对其的影响，并探讨了海岸带的可持续发展对策[8]。我国的人地关系研究起步较晚，吴传钧在 1981 年提出了“人地关系地域系统”的概念[9]，并倡导应用分类、区划、定量分析和模式、评价方法研究人地关系，为人地关系研究提供了重要的理论框架[10]。后来不少学者也都对人地关系的内涵、本质、影响因素和演变机制等做出了较为详细的阐述，鲁西奇[11]提出人地关系演变的地域一体化、深层次化、主客体一体化等特点。王建革[12]在分析华北平原人地关系演化的影响时，从制度角度讨论了与地理环境的关系。张建民[13]对鄱阳湖人地关系演变的因素和驱动力分析时提出了观念和意识对人地关系转变的重要驱动作用。

生态承载力是判断可持续发展的重要依据,国外学者对生态承载力和生态足迹都进行了大量的研究,并建立了一套衡量人地系统之间资源需求与可持续性的指标,为生态可持续性和人地协调研究做出了重大贡献。生态足迹模型由加拿大生态经济学家 William Rees 和 Wackernagel [14]共同研究,将生态足迹定义为基于某一地区土地面积的量化指标所反映人类对自然地理环境的影响,受到后期国内外生态学者的关注和讨论;Daberl [15]通过对澳大利亚 1926~1995 年的生态足迹的研究,并对所调查区域的生态承载力进行了测算。我国学者徐忠民[16]在 2000 年将生态足迹的模型和计算方法引入国内,李斌[17]以生态足迹和承载能力为依据,进一步计算了万元 GDP 的生态足迹,并且通过对比人均生态足迹和人均生态承载力的变化趋势,得出了生态赤字;方恺[18]等引进了三维生态足迹模型,并采用了资本流动占有率和存量流量利用比对 1961~2006 年中国的生态足迹进行了实证研究。

本文基于网湖流域土地利用类型演变数据,测算出人均生态足迹和人均生态承载力的变化趋势,以期网湖流域人地关系可持续发展提供科学的参考依据。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

网湖流域(115°14'00"E~115°25'42"E, 29°45'11"N~29°56'38"N),位于湖北省黄石市阳新县境内,处于长江中下游南岸,长江与富水交汇的三角地带,面积为 20,495 km²。流域内包括陶港镇、富池镇、兴国镇、木港镇、枫林镇、工业园区、半壁山管理区和综合管理区;流域内水体由网湖本体、绒湖、石灰寨湖、朱婆湖、宝塔湖、赛桥湖、下羊湖、西湖等湖泊组成[19]。该流域属于亚热带季风湿润气候区,平均气温在 16.2℃~16.6℃,降水量在 1100~1300 mm,地势略为西高东低、南高北低,地貌类型包括丘陵、河成平原和沼泽。

2.2. 数据来源

本文网湖流域土地利用类型遥感数据主要来源于地理空间数据库、Globe Land30 以及中国科学院地理科学资源环境与数据研究所。考虑到数据选取需要有代表性、客观性和直观性,同时还应考虑所选取的遥感影像数据既需要高精度又需要不同时段的对比。因此本文中的遥感影像都选取云量少的 5 月下旬至 6 月中旬或 8 月下旬至 9 月中旬图像。另外为直观表现网湖人地关系的历史演变,影像选取的时间段为 1980~2018 年间五个年份(1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年)的遥感影像数据及社会经济数据。遥感数据影像均来源于地理空间数据平台,社会经济数据来源于《黄石市统计年鉴》、《阳新县地方志》以及黄石市水利局统计公告。

3. 研究方法

3.1. 生态足迹模型

生态足迹是指能够持续地提供资源或具有生物生产力的地域空间,即维持一个地区的生存所需要的或者具有生物生产力的地域面积。生态足迹模型通过测量人类对自然资源的消耗和生态系统吸纳人类活动产生的废弃物的能力,来评估人类对生态系统的影响[20]。其具体计算公式如下:

$$E_F = N \cdot e_f = N \cdot \sum_{i=1}^n \frac{r_i c_i}{p_i} \quad (1)$$

式中: E_F ——总的生态足迹; i ——消费商品和投入的类型; p_i —— i 种消费商品的全球平均生产能力; c_i —— i 种商品的人均消费量; N ——人口数; e_f ——人均生态足迹。

3.2. 生态承载力模型

生态承载力(E_C)表示能够供给生物生存的面积,即在某一区域内,不损害区域自然条件下,各类生态资源所能承载的最大负荷度[21]。其计算公式如下:

$$E_C = N \cdot \sum_{i=1}^n e_c = N \cdot \sum_{i=1}^n a_i r_i y_i \tag{2}$$

式中, E_C ——区域生态承载力; e_c ——人均生态承载力; a_i ——第 i 类人均生态生产性土地面积; y_i ——产量因子; r_i 均衡因子; N ——总人口。本文均衡因子和产量因子均采用刘某承等基于净初级生产力对湖北省均衡因子的测算结果[22] (表 1)。

Table 1. Equilibrium factor and yield factor
表 1. 均衡因子和产量因子

项目	耕地	林地	水域	建筑用地
产量因子	1.66	0.91	1	1.66
均衡因子	1.11	0.83	0.63	0.49

3.3. 生态盈亏模型

生态赤字或生态盈余可以反映网湖流域人地关系协调度及生态可持续性,其模型由生态足迹和生态承载力之差得到。计算公式如下:

$$E_D(E_S) = E_C - E_F \tag{3}$$

式中, $E_D(E_S)$ 表示人均生态赤字(生态盈余)。当 $E_D(E_S) < 0$, 它表示该地区的生态资源供需不协调性,不能满足环境的资源需要;当 $E_D(E_S) > 0$, 它表示该地区的生态资源充足,资源供给能够满足资源需要。

4. 结果分析

4.1. 网湖土地利用类型分类结果

在 ENVI 5.2 软件中对网湖流域 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年的土地类型识别为 5 类,即旱地、林地、草地、水域、建设用地,分类后结合外野调绘对五期影像分类结果进行检验, kappa 系数均大于 0.85,符合本文研究的要求。在 ArcGIS10.6 中对五类土地类型面积进行统计如表 2。

Table 2. Statistics on the results of land use classification in the Net Lake Basin (hm²)
表 2. 网湖流域土地利用类型面积(hm²)

土地类型	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年
耕地	59,788	53,990	59,713	56,661
林地	81,920	80,272	79,693	77,246
草地	2027	1953	2007	2064
水域	13,647	15,727	14,966	16,418
建设用地	2779	2980	3080	4562

由表 2 可以看出, 水域面积整体上升, 1980 年的 13,647 hm² 增加到 2018 年的 16,515 hm²; 林地占地面积最大, 但处于缩减的趋势, 1980~2018 年缩减了 4888 hm²; 建设用地总体呈现扩张变化, 由 2779 hm² 扩张到 4423 hm²; 耕地面积呈现波动趋势, 1980~1990 年缩减了 5798 hm², 随着人口的扩张和农业产业结构的调整, 2000 年耕地面积扩展到了 59,713 hm², 2006 年网湖湿地升为省际自然生态保护区, 流域内通过退耕还湖的措施, 控制了耕地面积的扩张。

4.2. 网湖流域人均生态足迹变化分析

由表 3 可以看出网湖流域 1980~2018 年人均生态足迹波动变化, 其中在 1990 年达到最高值, 为 1.4330 hm²/人, 相比于 1980 年增长了 0.213 hm²/人, 这说明在经济发展初期, 资源利用效率相对较低, 浪费现象较为普遍。这导致了资源的过度消耗, 进而加剧了人均生态足迹的增加。随着 2001 年以来网湖湿地自然保护区管理局机构不断完善, 网湖湿地自然保护区计划在“十二五”期间努力建成保护良好的国家级自然保护区, 网湖人均生态足迹明显有所下降。耕地生态足迹一直大于其他四类土地, 表明随着网湖流域及周边地区的经济发展, 工业化、城市化进程加快, 人口数量增加, 对资源的需求也随之增加, 这导致了耕地人均生态足迹的上升。水域人均生态足迹最小, 只有在 1990 年超过了 0.1 hm²/人, 1980~2000 年水资源人均生态足迹增长了 0.008 hm²/人, 2000~2018 年不断降低, 说明政府加强了对水资源的管理和调控, 这些政策法规的实施有助于遏制过度开采和浪费水资源的现象, 水资源人均生态足迹不断减小。建设用地人均在生态足迹呈现先降低后增高的变化, 2000~2018 年增加了 4 倍, 反映了城市化进程的加速导致大量农村人口涌入城市, 增加了对住房、交通、公共设施等的需求, 进而推动了建设用地的扩张。因此网湖流域的人地关系可持续发展关键在于提高土地利用效率, 加强网湖生态环境治理。

Table 3. Changes in the ecological footprint per capita in the Net Lake Basin (hm²/person)

表 3. 网湖流域人均生态足迹变化(hm²/人)

年份(年)	耕地	林地	水域	建设用地	人均生态足迹
1980	0.7032	0.1764	0.0092	0.1612	1.0771
1990	0.8862	0.2439	0.0132	0.2315	1.4330
2000	0.6123	0.2371	0.0092	0.0513	0.9362
2010	0.3124	0.1763	0.0068	0.1082	0.6248
2018	0.2067	0.188	0.0063	0.2040	0.6169

4.3. 网湖流域生态承载力演变过程

由表 4 可以看出网湖流域人均生态承载力总体呈现下降趋势, 1980~1990 年由 1.6977 hm²/人降至 1.3164 hm²/人, 2000~2010 年生态承载力波动最小, 2018 年最低, 为 0.5675 hm²/人。各土地利用类型的人均生态承载力差异较大, 耕地和林地人均生态承载力远大于其他土地类型, 水域人均生态承载力最小, 草地人均生态承载力波动变化最小。主要是由于耕地、林地和草地具有较高的生产潜力和稳定性, 以及流域内相关耕地保护制度、加强林业生态建设等措施耕地和林地的生态功能得到有效保护, 从而提高了其人均生态承载力; 而水域更容易受到人类活动的污染和过度开发, 水污染会破坏水生生态系统的平衡, 降低水域的生产能力, 使得水域的人均生态承载力受到严重制约, 导致其人均生态承载力相对较小。因此, 网湖流域在未来的生态环境保护工作中, 应继续加强耕地和林地的保护力度, 同时采取有效措施治理水域污染和过度开发问题, 以实现生态系统的可持续发展。

Table 4. Changes in per capita ecological carrying capacity in the Net Lake Basin (hm²/person)
表 4. 网湖流域人均生态承载力变化(hm²/人)

年份(年)	耕地	林地	水域	建设用地	人均生态承载力
1980	0.9799	0.6448	0.0046	0.0918	1.6977
1990	0.5937	0.4054	0.003	0.0726	1.3164
2000	0.4927	0.3238	0.0023	0.0507	0.8786
2010	0.4983	0.2582	0.0615	0.042	0.8727
2018	0.3308	0.177	0.022	0.0283	0.5675

4.4. 网湖流域生态盈亏分析

由表 5 可知，在研究时期内网湖流域的人均生态盈亏呈现持续波动变化，平均人均生态赤字为 0.12898 hm²/人，赤字最大为 1990 年的 0.1166 hm²/人，最小值为 2018 年的 0.0494 hm²/人。主要原因可能是人类活动对网湖生态系统的干扰可能会导致其盈亏状态的波动。随着人口的增长和经济的发展，为了满足粮食生产、城市建设等需求，人们往往会选择围垦河流、湖泊等水域周边的滩涂和低洼地，从而导致围垦面积扩大，不合理的开发利用方式会破坏生态系统的平衡。为了缓解围垦活动对流域内生态环境的破坏，阳新县水利局建立了生态补偿机制，通过向围垦区域周边地区或生态系统提供经济补偿或资源支持，以鼓励其保护和恢复生态环境，2018 年网湖流域生态盈余转为生态赤字。综合来看，长期的盈亏波动变化可能表明网湖流域的生态系统正在经历退化过程，因此提升生态系统的稳定性和服务功能以促进流域的可持续发展显得尤为关键。

Table 5. Per capita ecological deficit and per capita ecological surplus in Net Lake
表 5. 网湖人均生态赤字与人均生态盈余

年份(年)	耕地	林地	水域	建设用地	人均生态赤字(盈余)
1980	0.2767	0.4684	-0.0046	-0.0694	0.6206
1990	-0.2925	0.1615	-0.0102	-0.1589	-0.1166
2000	-0.1196	0.0867	-0.0069	-0.0006	-0.0576
2010	0.1859	0.0819	0.0547	-0.0662	0.2479
2018	0.1241	-0.011	0.0157	-0.1757	-0.0494

5. 结论

本文以网湖流域为研究对象，利用 ENVI 5.2 以及 ArcGIS 10.6 软件对 1950~2018 年间的五个年份的遥感影像进行了土地利用分类；基于生态足迹法对网湖流域人均生态承载力和人均生态足迹状况进行了分析。主要结果如下：

- (1) 1980~2018 年间网湖流域水域面积整体上升、耕地面积先减后增再减，网湖自然保护区的管理措施有效保护了网湖土地资源。人均生态足迹呈现出先增后减的趋势，耕地生态足迹一直大于其他四类土地。主要原因是随着网湖流域及周边地区的经济发展，工业化、城市化进程加快，人口数量增加，对资源的需求也随之增加。政府通过制定一系列环保政策和法规，对资源消耗和污染排放进行约束和限制。这些政策和法规的实施有助于推动企业和个人采取更加环保的生产和生活方式，从而降低人均生态足迹。
- (2) 网湖流域人均生态承载力总体呈现下降趋势，说明近些年来网湖流域的生态系统逐渐表现出脆弱性。耕地和林地人均生态承载力最大，水域人均生态承载力最小，主要是因为耕地和林地与水域在资

源特性、生态功能、利用方式和管理措施等多个方面有差异, 水域资源的开发和利用受到多种因素的制约, 加剧了水域生态承载压力。因此, 需要采取科学合理的措施加强流域内资源的管理和保护。

(3) 网湖流域的生态盈亏整体表现为生态赤字, 呈现“赤字-盈余-赤字-盈余”的波动变化趋势, 赤字最大为1980年的 $0.6206 \text{ hm}^2/\text{人}$, 最小值为2010年的 $0.2479 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。反映了网湖流域生态系统的不稳定性、水资源管理的复杂性、生态保护和修复的紧迫性, 因此需要相关政策和管理措施需要具备一定的适应性。即能够根据生态系统的实际情况进行灵活调整, 以确保政策的有效性和针对性。

参考文献

- [1] Du, X. and Shi, D. (2019) Rural Heritage: Value, Conservation and Revitalisation—From the Perspective of the Human-Land Relationship. *Built Heritage*, **3**, 1-6. <https://doi.org/10.1186/bf03545723>
- [2] 王武科, 李同升, 张洁. 关中平原全新世以来人地关系地域系统时空演变分析[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(6): 32-37.
- [3] Gao, X., Li, T. and Sun, D. (2021) Regional Differentiation Regularity and Influencing Factors of Population Change in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, **31**, 888-899. <https://doi.org/10.1007/s11769-021-1223-7>
- [4] 程钰. 人地关系地域系统演变与优化研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2014.
- [5] 赵奎涛. 明末清初以来大凌河流域人地关系与生态环境演变研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [6] Wyszowski, M., Wyszowska, J., Kordala, N. and Borowik, A. (2022) Effects of Coal and Sewage Sludge Ashes on Macronutrient Content in Maize (*Zea mays* L.) Grown on Soil Contaminated with Eco-Diesel Oil. *Materials*, **15**, Article 525. <https://doi.org/10.3390/ma15020525>
- [7] Mensing, S., Schoolman, E.M., Palli, J. and Piovesan, G. (2020) A Consilience-Driven Approach to Land Use History in Relation to Reconstructing Forest Land Use Legacies. *Landscape Ecology*, **35**, 2645-2658. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01079-5>
- [8] Tan, W. and Li, X. (2017). Guidance of the Coordination Theory of Man-Land Relationship to Land Exploitation and Utilization. 2017 4th International Conference on Industrial Economics System and Industrial Security Engineering (IEIS), Kyoto, 24-27 July 2017, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ieis.2017.8078652>
- [9] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统[J]. 经济地理, 1991, 12(3): 1-6.
- [10] 吴传钧. 人地关系地域系统的理论研究及调控[J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2008, 40(2): 1-3.
- [11] 鲁西奇. 人地关系理论与历史地理研究[J]. 史学理论研究, 2001(2): 36-46.
- [12] 王建革. 河流和圩田体系的生态变迁与长三角近代文明的成长[J]. 近代史研究, 2022(2): 27-31.
- [13] 张建民, 鲁西奇. “了解之同情”与人地关系研究[J]. 史学理论研究, 2002(4): 15-25, 160.
- [14] Kongbuamai, N., Bui, Q., Yousaf, H.M.A.U. and Liu, Y. (2020) The Impact of Tourism and Natural Resources on the Ecological Footprint: A Case Study of ASEAN Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 19251-19264. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08582-x>
- [15] Mancini, M.S., Galli, A., Coscieme, L., Niccolucci, V., Lin, D., Pulselli, F.M., et al. (2018) Exploring Ecosystem Services Assessment through Ecological Footprint Accounting. *Ecosystem Services*, **30**, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.01.010>
- [16] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国1999年生态足迹计算与发展能力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280-285.
- [17] 李斌. 重庆市生态足迹动态特征及趋势研究[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(9): 1091-1095.
- [18] 方恺, Heijungs Reinout. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707.
- [19] 史小丽, 秦伯强. 长江中游网湖近代沉积环境演变及其对人类活动的响应[J]. 地理研究, 2013, 32(5): 808-816.
- [20] 王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80-90.
- [21] 朱雪颖, 黄生志, 黄强, 等. 塔里木河流域水资源生态承载力动态评价与预测[J]. 人民珠江, 2024, 45(3): 79-88.
- [22] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401-406.