中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于GIS的跨流域生态补偿模型构建及应用——以安徽省大别山区为例

孙贤斌， 孙良萍， 王升堂， 李光耀， 张欣

引用本文:
孙贤斌, 孙良萍, 王升堂, 等. 基于GIS的跨流域生态补偿模型构建及应用——以安徽省大别山区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 458–466.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190464

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究

Assessment of the functions and ecological services values of green manure in paddy fields in South China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 327–336 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180525

基于LUCC的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究

Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 142–152 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180493

重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析

Temporal and spatial variation and driving factors of farmland ecological service value in Chongqing

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1637–1648 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190192

粮食安全视角下的环京津地区耕地生态补偿量化研究

Quantitative study on cultivated land ecological compensation in the area around Beijing and Tianjin from the perspective of grain security

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1052–1059 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161080

基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究

Study on dynamic changes in ecosystem service values in Qinglong County based on coefficient correction

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 971–980 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180927

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 3 月 第 28 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2020, 28(3): 458−466

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190464

孙贤斌, 孙良萍, 王升堂, 李光耀, 张欣. 基于 GIS 的跨流域生态补偿模型构建及应用——以安徽省大别山区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 458−466

SUN X B, SUN L P, WANG S T, LI G Y, ZHANG X. Construction and application of an ecological compensation model based on GIS for cross-basin areas — A case study of the Dabie Mountain areas in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 458−466

基于 GIS 的跨流域生态补偿模型构建及应用*

——以安徽省大别山区为例

孙贤斌[1], 孙良萍[2], 王升堂[1], 李光耀[1], 张 欣[1]

(1. 皖西学院环境与旅游学院 六安 237012; 2. 安徽财经大学会计学院 蚌埠 233030)

摘 要: 构建市场化与多元化生态补偿机制是完善主体功能区配套政策之一, 探索跨流域主体功能区之间生态补偿对推进生态文明建设具有重要意义。本研究通过修正参数的生态足迹法构建生态补偿标准模型, 利用生态流和引力模型理论构建跨流域功能区之间的生态补偿费用分配模型, 借助 GIS 技术开展安徽省大别山区实证分析。结果表明: 1)根据开发型区域的支付能力和生态承载力, 结合保护型区域提供的生态系统服务价值和效用影响范围、生态补偿标准和生态流系数等, 依据大别山区生态环境条件, 构建的跨流域主体功能区生态补偿模型能够符合实际, 因此生态补偿标准核算科学、可行。跨流域生态补偿模型具有可应用操作性, 可用于安徽省大别山区空间差异化、定量化生态补偿标准的分析。2)2015 年, 金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地均对合肥市区-肥西-肥东开发区生态辐射面积最大, 分别为 4 521.92 km^2、5 102.92 km^2, 生态辐射价值总量也最大, 分别为 3 617.82 万元、3 858.15 万元。所以此开发区是水源地最主要的生态补偿费用来源。合肥市区-肥东-肥西距离两个农业主产区近, 被影响的生态辐射的面积也最大, 所以辐射到的生态服务价值也均最大, 分别为 2 098.23 万元、2 717.19 万元。3)安徽省大别山及其周围的 4 个开发型区域支付生态补偿资金总额为 14 243.95 万元, 各区所占比例分别为 78.38%(合肥市区-肥东-肥西)、9.28%(安庆市区)、9.34%(淮南市区)和 2.99%(金安区)。合肥市区是最主要生态补偿来源。4)安徽省大别山区的金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地分别为开发型区域提供 5 767.97 万元(占 29.1%)、5 873.52 万元(占 29.63%)的生态功能服务, 周围的农业主产区也提供了 8 177.17 万元(占 41.26%)的生态功能服务。5)金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地获得补偿资金分别是 4 236.75 万元(占 29.74%)、4 421.54 万元(占 31.04%), 是受偿的主要区域。周围的农业主产区也获得 5 585.66 万元(占 39.22%)的补偿。生态补偿模型及标准可为主体功能区环境保护和建设提供科学参考依据。

关键词: 跨流域; 生态补偿模型; 生态服务价值; 主体功能区; GIS; 安徽省大别山区

中图分类号: X22 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Construction and application of an ecological compensation model based on GIS for cross-basin areas — A case study of the Dabie Mountain areas in Anhui Province*

* 安徽高校省级自然科学重点研究项目(KJ2018A0418, KJ2016A746, KJ2018A0421)、安徽高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016246)和安徽省省级质量工程项目(2017jyxm0393, 2019kfkc112)资助
孙贤斌, 研究方向为资源生态与 GIS。E-mail: 532679342@qq.com
收稿日期: 2019-06-23 接受日期: 2019-11-21

* This study was funded by the Key Natural Science Research Project of Anhui Universities (KJ2018A0418, KJ2016A746, KJ2018A0421), the Key Project of Outstanding Young Talents Support Program of Anhui Universities (gxyqZD2016246) and the Anhui Provincial Quality Engineering Project (2017jyxm0393, 2019kfkc112).
Corresponding author, SUN Xianbin, E-mail: 532679342@qq.com
Received Jun. 23, 2019; accepted Nov. 21, 2019

SUN Xianbin[1], SUN Liangping[2], WANG Shengtang[1], LI Guangyao[1], ZHANG Xin[1]

(1. College of Environment and Tourism, Wanxi University, Lu'an 237012, China; 2. College of Accounting, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu 233030, China)

Abstract: Marketization and diversified ecological compensation are the supporting policies to improve the main functional zones. In this paper, a standard model of ecological compensation was established using the modified ecological footprint method. And the model of ecological compensation cost distribution among functional areas across river basins was established using the theories of ecological flow and gravitational model theory. An empirical analysis of the Dabie Mountain areas in Anhui Province was carried out using the GIS technology. The results revealed the following: 1) According to the ability to pay for development areas and the ecological carrying capacity, combining the value and effect scope of ecosystem services, the ecological compensation standard, and the ecological flow coefficient provided by the protected areas, the ecological compensation model of inter-basin function area were constructed based on the environment conditions in the Dabie Mountain area. Therefore, the ecological compensation model could be scientifically adapted to the real world and could be applied to analyze spatial differentiation and quantify ecological compensation standards in the Dabie Mountain area. 2) In 2015, Jinzhai-Huoshan water source and Yuexi-Taihu-Qianshan water source had the largest ecological radiation area in the urban area of Hefei-Feixi-Feidong development zone (4 521.92 km^2 and 5 102.92 km^2, respectively), and the total value of ecological radiation of the two water sources was also the largest (36.178 2 and 38.885 million ¥, respectively). Therefore, the development zone was the main source of ecological compensation costs for the water source area. The Hefei-Feixi-Feidong development zone was close to two major agricultural producing areas, and the area affected by ecological radiation was also the largest; therefore, the value of ecological services was the largest, which was 20.982 3 million ¥ and 27.171 9 million ¥, respectively. 3) The total amount of ecological compensation provided by the four development areas was 142.439 5 million ¥, and the proportion of each area was 78.38% (Hefei Urban Region, Feidong County, and Feixi County), 9.28% (Anqing Urban Region), 9.34% (Huainan Urban Region), and 2.99% (Jin'an Region). The ecological compensation was mainly provided by Hefei City. 4) Jinzhai-Huoshan water source and Yuexi-Taihu-Qianshan water source provided ecological services valued at 57.679 7 million ¥ (accounting for 29.1%) and 58.735 2 million ¥ (accounting for 29.63%), respectively, for the development area. The surrounding main agricultural production areas also provided eco-functional services valued at 81.771 7 million ¥ (accounting for 41.26%). 5) The compensation funds provided for two water source areas were 42.367 5 million ¥ (accounting for 29.74%) and 44.245 4 million ¥ (accounting for 31.04%), respectively, and they were the main areas of compensation. The surrounding main agricultural areas also received a compensation of 55.856 6 million ¥ (accounting for 39.22%). The ecological compensation model and standard provide a scientific reference for environmental protection and construction of main functional areas.

Keywords: Cross-basin area; Ecological compensation model; Ecosystem services value; Main functional area; GIS; Dabie Mountain areas in Anhui Province

党的十九大报告提出建立国土空间开发保护制度，完善主体功能区配套政策，实现我国自然生态保护新模式[1]。生态补偿是主体功能区有效实施的重要配套措施，是促进区域协调发展、平衡区域间利益、缩小区域差异的重要保障[2-3]。国内外学者已经在生态补偿的理论内涵、标准和补偿模式、政策和机制等方面做了大量研究，主要集中在森林、流域、草地、湿地等领域[4-5]。生态补偿标准计算方法主要有价值理论(生态系统服务价值、NPP 模拟法)、市场理论(水资源、碳排放、生态足迹)、半市场理论(CVM 法、成本费用法、机会成本法等)3 个方面[5-10]。主要模型方法有 NPP 模拟、GIS-ESDA、水量分配模型等[5-6,8-12]。国内有关主体功能区定量化生态补偿标准模型研究还较少，多学科方法技术交叉融合综合应用研究急需加强，目前多数存在补偿标准偏低和无差异化等问题，生态补偿空间差异性机制尚未形成[4-6,13]。如徐梦月等[13]构建主体功能区生态补偿模型的概念模型，但需要借助 GIS 工具给予实现及实证；谭佳音等[14]构建跨流域调水工程生态补偿分摊 DEA 模型，基于受水区的投入资金获取收益(即生态保护成本投资)进行分摊分配，分摊定量模型在空间差异性分析方面需要进一步深入探讨。本研究在前人主体功能区生态补偿概念模型研究的基础上，以安徽省大别山区为例开展跨流域主体功能区生态补偿定量模型构建及实证分析，弥补主体功能区生态补偿模型的定量化、空间差异化的不足，尤其通过 GIS 工具操作和实施，使定量化模型具有应用性。

大别山区是国家重点水土保持生态功能区，生态环境保护和区域协调发展是其面临的两个重要课

题，受到相关政府和学者们特别关注。安徽省政府计划到 2020 年实现森林、水源地、湿地等重点地域和重点生态功能区补偿全覆盖。所以从主体功能区区划出发，构建其差异性补偿模型及应用已成为大别山区主体功能区目标有效实现的迫切需求，对区域生态保护与协调发展具有极其重要的现实意义和应用价值。

1 研究区概况

大别山区地跨鄂、豫、皖 3 省，安徽省境内包括六安市(霍邱县、霍山、金寨、舒城、金安区、裕安区、叶集区)和安庆市(岳西、潜山、太湖、潜山)11 个县区单元，总面积 2.36 万 km^2，占安徽省总面积的 16.9%；2016 年人口 840 多万人，占安徽省总人口的 15.6%。

1.1 安徽省大别山贫困集中连片区

2014 年安徽省大别山区人均 GDP 1.637 万元，远低于安徽省(3.427 万元)和全国(4.653 万元)平均水平，也远低于合肥市的人均 GDP(6.739 万元)。所以，在 2011 年《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020 年)》中，将安徽省大别山区 12 个县区及周边的贫困县区化为集中连片特困地区，具体包括六安市(霍邱、霍山、金寨、舒城、金安区、裕安区、叶集区)、安庆市(岳西、潜山、太湖、潜山、望江)、阜阳市(临泉、颍上、阜南)、 淮南市(寿县)、亳州市(利辛)。2013 年，大别山集中贫困片区贫困发生率 20.7%，是国家贫困人口规模最大、贫困人口密度最大的片区，扶贫攻坚任务艰巨。

1.2 安徽省大别山区及其周围主体功能区

我国四大主体功能区分为开发型区域(优化开发、重点开发区)与保护型区域(限制开发区、禁止开发区)两大类。依据生态环境价值理论、外部性理论和公共产品理论，由开发型区域给予保护型区域补偿是必然的选择[2,13]。根据安徽省主体功能区规划[15]，安徽省大别山区金寨、霍山、岳西、潜山和太湖为限制开发区(国家 25 个重点水源涵养地生态功能区之一)，周围的合肥市区、肥东县、肥西县、六安市的金安区和安庆市区、淮南市区为重点开发区(国家 18 个重点开发区域之一)，黄淮海平原(淮河农产品主产区，包括临泉等)和长江流域(长江农产品主产区，包括庐江等)农产品主产区也为限制开发区。

本研究中的六安市、淮南市和淮河农产品主产区属于淮河流域，而安庆市、合肥市和长江农产品主产区属于长江流域，大别山区为江淮分水岭；其中金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地分别给上述区域提供交叉生态服务，其生态补偿属于跨流域。鉴于生态补偿需要考虑提供补偿区和接受补偿区，结合生态功能区的服务范围、安徽省大别山区水源生态功能区与周围功能区的定位(开发型区域和保护型区域)、贫困片区的实际，即综合区域的生态和社会经济等因素，确定研究区的范围如图 1 所示。本研究中限制开发区(水源涵养生态功能区和农产品主产区)为生态受偿区，提供补偿的为重点开发区。从生态补偿主客体利益来看，生态补偿的主体是重点开发区，生态补偿的客体是限制开发区(图 1)。

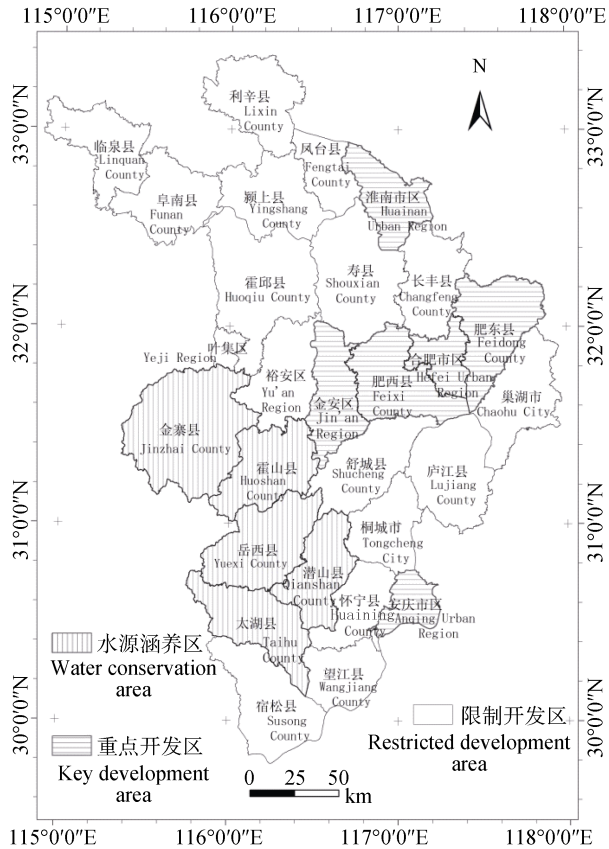

图 1 研究区及主体功能区分布

Fig. 1 Map of the study area and distribution of the main functional areas

2 主体功能区生态补偿模型的构建

多数生态补偿涉及跨不同生态功能区(或跨流域或跨行政区)，我国四大主体功能区分为开发型区域(优化开发、重点开发区)与保护型区域(限制开发区、禁止开发区)两大类。对于开发型区域向保护型区域提供生态补偿，确定生态补偿标准之后对于限制开发区和禁止开发区如何合理分配，需要构建科学合理的补偿模型。

2.1 开发型区域生态补偿的支付模型

开发型区域生态补偿资金的多少主要考虑生态

资源需求量和经济发展水平两个方面。生态资源需求量可由区域的生态赤字或生态盈余来确定, 可通过计算区域生态足迹和生态承载力来确定[16]。

不同开发型区域的社会经济发展水平和生态补偿支付能力不同。区域支付能力的差异, 可以引入生态足迹效率参数(区域 GDP 与生态足迹的比值), 对生态足迹的修正来反映经济发展水平的差异[13,16]。不同主体功能区之间的生态补偿是由政府间财政转移方式支付的, 故引入财政收入与恩格尔系数(也间接反映区域经济发展水平和支付能力)对其进行修正, 修正后的生态补偿标准公式[13,16-17]为:

$$EC=(EF-ED)\times GDP/AEF\times R \tag{1}$$

式中: EC 为开发型区域支付生态补偿的标准; EF 为开发型区域生态足迹; ED 为开发型区域生态承载力; GDP 为国内生产总值(安徽省); AEF 为安徽省总的生态足迹, 2014 年安徽省人均生态足迹为 2.364 $hm^2\cdot$人$^{-1}$; R 为修正系数, 计算公式[13,16-17]为:

$$R=e^{\varepsilon}\times F_i/(1+e^{\varepsilon})\times F \tag{2}$$

式中: F_i 为开发型区域地方财政收入, F 为开发型区域所在的市(或省)总财政收入, ε 为恩格尔系数。以上两式中 GDP、生态承载力、生态足迹、恩格尔系数、总财政收入等变量体现了修正各区域的差异性, 使用此式计算生态补偿标准具有适用性。

2.2　保护型区域提供的生态服务价值总量

生态流(物质流、能量流、信息流)通过多种形式、多种渠道进行着物质循环和能量转化, 自然生态系统的主要功能流[18], 主要由保护型区域流向开发型区域, 产生生态服务功能。保护型区域的生态服务辐射达到的开发型区域应根据生态辐射量大小给予提供相对生态补偿资金。为此借鉴断裂点公式估算生态服务距离或范围, 利用场强公式估算从保护型区域流转(或扩散)到开发型区域的生态服务功能量, 定量化分析两类区域之间的生态流(包括路径、强度、方向和速率等)互相作用关系。生态服务功能价值辐射的断裂点公式[18-19]为:

$$D_p=\frac{D_{dp}}{1+\sqrt{(N_d+N_P)}} \tag{3}$$

式中: D_p 是保护型区域到断裂点的距离或生态辐射半径; D_{dp} 是保护型区域与开发型区域之间的(质心或几何中心)距离; N_d、N_p 分别为开发型区域和保护型区域生态系统服务功能价值(由此计算保护型区域生态补偿金分配比, 为计算方便, 可直接采用单位面积生态服务价值当量计算服务功能价值)。根据求得的断裂点距离, 借助 ArcGIS10.3 软件分析模块的缓冲工具与叠加功能, 计算得出保护型区域生态服务辐射面积 S。

利用场强公式计算保护型区域流转(或扩散)到开发型区域的生态服务功能量(V_{dp})[18-19]:

$$V_{dp}=\sum_{i=1}^{n}K\times\frac{M_{dp}\times S}{D_{dp}^2} \tag{4}$$

式中: M_{dp} 为保护型区域与开发型区域之间某种形式(如水、土、生物等, 即 i 种生态服务形式)单位生态服务功能价值转移量; S 是辐射(或生态影响)面积; K 为生态服务自然流转的影响因子, 参考前人标准(K 一般取 0.6), 本文考虑区域环境(即亚热带山区河流上游)的水、风、生物等介质传递生态服务的频度、规模较大, K 取 0.8[13,18-19]; D_{dp} 是保护型区域与开发型区域之间的(质心或几何中心)距离; i 为提供生态服务功能的种类; n 为提供生态服务功能的类别数[13,18-19]。

2.3　保护型区域生态补偿分配模型

由修正后的生态足迹法估算出不同开发型区域应支付的补偿标准(表 1), 同时由场强公式也计算出各保护型区域提供(辐射)给不同开发型区域的生态服务功能量(V_{dp}), 由此求得各开发型区域支付给不同保护型区域的生态补偿资金比例, 再根据生态足迹法求得的补偿总数以估算各保护型区域的补偿标准。

表 1 是开发型区域和保护型区域补偿和生态服务的矩阵。开发型区域 1 和 2 经生态足迹法计算得到生态补偿总量分别为 A 与 B, 保护型区域 a 为开发型区域 1 与 2 提供的生态系统服务功能总量分别为 α 与 β, 保护型区域 b 为开发型区域 2 提供的生态系统服务功能总量为 γ 和 θ, 则保护型区域 a 得到的生态补偿总金额分别为[12]: $A\times\alpha/(\alpha+\gamma)+B\times\beta/(\beta+\theta)$, 分别来自开发型区域 1 和 2; 同理保护型区域 b 得到的生态补偿总金额分别为[12]: $A\times\gamma/(\alpha+\gamma)+B\times\theta/(\beta+\theta)$, 分别来自开发型区域 1 和 2。以上考虑的 2 个开发区和 2 个保护区是交叉补偿和服务, 如果是单向补偿服务和多项交叉补偿服务原理类似。

3　数据来源及处理

本研究使用的数据分别为安徽统计年鉴(2016 年)和 TM 遥感影像(2015 年 5 月)。其中遥感影像经过裁剪、增强处理、几何校正, 然后采用不同监督分类法进行图像地物分类、精度比较、野外验证等过程, 在 ArcGIS 10.3 中统计各土地类型面积(图 2)。各县区生态服务价值估算采用谢高地等[20]修订的生

表 1 研究区不同开发型区域为不同保护区提供的生态补偿分配矩阵

Table 1 Matrix of ecological compensation allocation provided by different development areas for different reserves in the study area

支付生态补偿区域 Paying area of ecological compensation	提供支付 Provided payment	获得生态补偿的区域 Area accepting ecological compensation	
		保护区 a Reserve a	保护区 b Reserve b
开发区 1 Development area 1	A	$A\times\alpha/(\alpha+\gamma)$	$A\times\gamma/(\alpha+\gamma)$
开发区 2 Development area 2	B	$B\times\beta/(\beta+\theta)$	$B\times\theta/(\beta+\theta)$
获得分配总和 Total distribution	$A+B$	$A\times\alpha/(\alpha+\gamma)+B\times\beta/(\beta+\theta)$	$A\times\gamma/(\alpha+\gamma)+B\times\theta/(\beta+\theta)$

α 和 β 分别为保护区 a 为开发区 1 和开发区 2 提供的生态服务价值, γ 和 θ 分别为保护区 b 为开发区 1 和开发区 2 提供的生态服务价值。α and β are ecological services values of the Reserve a providing for the development area 1 and 2; γ and θ are ecological services values of the Reserve b providing for the development area 1 and 2.

态价值当量, 利用区域各类土地利用面积, 估算各区域生态功能服务价值。各市人均生态足迹、人均生态承载力参考文献[21-22]。各区域地方财政收入、各市总财政收入、总人口和 GDP 等数据由《安徽统计年鉴—2016》获得。总生态足迹、总生态承载力由 Excel 计算得到。

4 结果与分析

4.1 开发型区域生态补偿的支付量

生态盈余或赤字反映区域的可持续发展程度。生态赤字说明本地区人均占用生态资源量大于本身生态承载力, 其生态资源需求不能持续满足, 要维持区域发展只有过度开发利用本区资源或从其他区域购买生态产品和服务, 否则就出现不可持续性。而生态盈余说明本地区人均占用生态资源量还在本身生态承载力的范围内, 其生态资源需求能够满足。所以从区域发展的可持续角度, 通过生态足迹模型测算生态盈余区域向其他区域提供的生态产品和服务, 即相对生态补偿标准, 结合区域相对财政收入和恩格尔系数情况, 即为实际生态补偿支付标准。2015 年各开发型区域生态足迹及具体补偿支付标准如表 2 所示。

从人均生态足迹和人均生态承载力来看, 金安区最大, 分别为 0.329 $hm^2\cdot人^{-1}$、2.717 $hm^2\cdot人^{-1}$, 合肥市区、肥东和肥西最小, 分别为 0.16 $hm^2\cdot人^{-1}$、2.042 $hm^2\cdot人^{-1}$。生态补偿标准以合肥市区最大, 达 8 692.44 万元, 其次是淮南市区, 为 1 330.34 万元, 金安区最小, 为 427.56 万元(表 2)。

表 2 2015 年研究区开发型区域生态足迹及补偿支付

Table 2 Ecological footprint and compensation payment of the development areas in the study area in 2015

开发区域 Development area	人均生态承载力 (ec) Ecological carrying capacity per cap. ($hm^2\cdot cap.^{-1}$)	生态足迹(Ef) Ecological footprint ($hm^2\cdot cap.^{-1}$)	生态承载力(ED) Ecological carrying capacity ($\times10^4$ hm^2)	GDP ($\times10^8$ ¥)	总生态足迹 (AEF) Total ecological footprint ($\times10^4$ hm^2)	地方财政收入 (F_i) Local financial revenue ($\times10^8$ ¥)	总财政收入 (F) Total financial revenue ($\times10^8$ ¥)	支付生态补偿标准(EC) Paying ecological compensation ($\times10^4$ ¥)
合肥市区 Hefei Urban Region	0.160	2.042	39.264	3 434.45	501.107	312.78	500.34	8 692.44
肥东 Feidong County	0.160	2.042	16.880	448.51	215.431	23.27	40.34	1 230.18
肥西 Feixi County	0.160	2.042	12.816	508.80	163.565	33.15	56.34	1 368.17
安庆市区 Anqing Urban Region	0.261	2.683	19.184	432.39	197.201	23.91	42.65	1 321.79
淮南市区 Huainan Urban Region	0.261	2.117	44.266	565.94	359.043	36.36	60.36	1 330.34
金安区 Jin'an Region	0.329	2.717	28.788	141.28	237.738	11.69	18.86	427.56

4.2 保护型区域流转的生态系统服务功能量

由生态服务价值当量和水源地各县的土地利用类型面积, 测算开发型和保护型区域生态系统服务功能价值总量分别为 6 931 万元(N_d)、50 264 万元(N_p); 金寨-霍山水源地中心点和最远开发区肥西中心距离为 178.8 km, 岳西-太湖-潜山水源地中心和最远淮南市区中心距离为 222.3 km, 由此计算两大水源地最远生态辐射距离分别为 130.5km、162.4 km。依此距离建立缓冲区(图 3), 分别求得两大水源地辐射影响(或生态价值流转)各开发区的面积 S。两个农业区最远

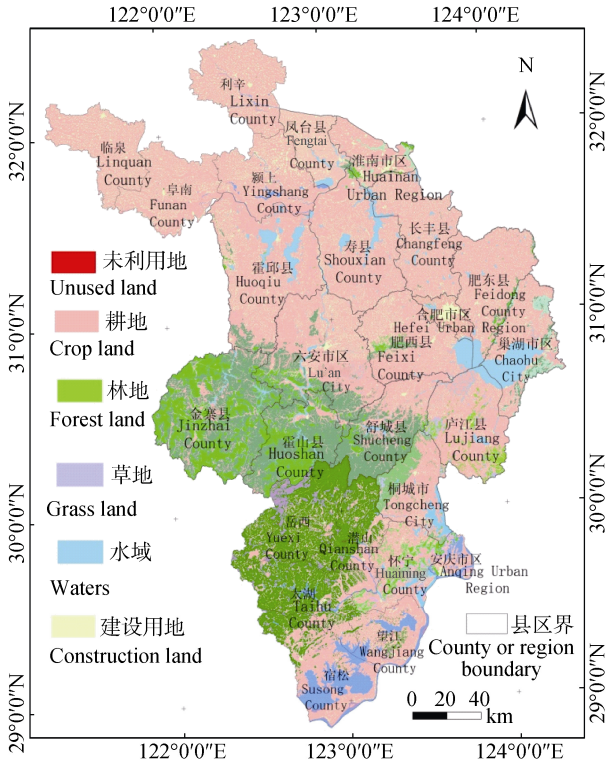

图 2　研究区 2015 年土地利用类型

Fig. 2　Land use types of the study area in 2015

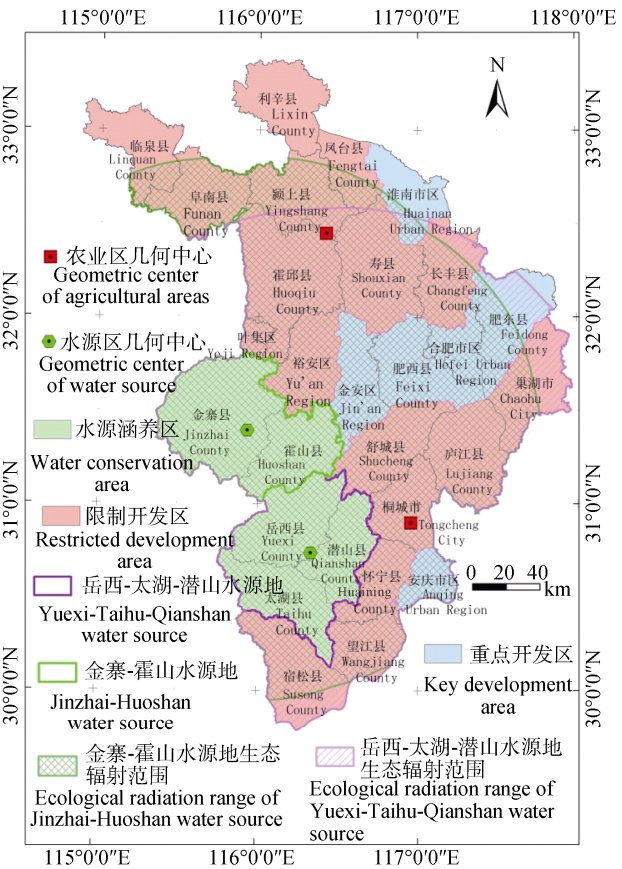

图 3　研究区主体功能区类型及水源地生态功能辐射范围

Fig. 3　Types of main functional areas and radiating range of ecological functions of water sources in the study area

生态辐射距离分别为 147.1 km、108.63 km，类似求得两个农业区辐射影响各开发区的面积 S，由此求得生态系统服务价值总量。

金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地均对合肥市区-肥西-肥东开发区生态辐射面积最大，分别为 4 521.92 km^2、5 102.92 km^2，生态辐射价值总量也最大，分别为 3 617.82 万元、3 858.15 万元。所以此开发区是水源地最主要的生态补偿费用来源。淮南市区距离较远，辐射面积较小，分别为 94.01 km^2、88.52 km^2，所以流转到的生态服务价值相对较小。金安区和安庆市区均在辐射范围之内，金安区面积较大，距离保护区也较近，所以流转到的生态服务价值较大。

两个农业主产区也属于限制开发区，属于保护型区域，对开发型区域都有生态价值辐射。合肥市区-肥东-肥西距离两个农业主产区近，被影响的生态辐射的面积也最大，所以辐射到的生态服务价值也均最大，分别为 2 098.23 万元、2 717.19 万元。

4.3　保护型区域生态补偿分配

由保护型区域提供给各开发区的生态服务价值量的比例，结合生态足迹差异提供支付的资金总量，分配给各保护型区域的生态补偿资金如表 3 所示。4 个开发型区域支付补偿资金总量为 14 243.95 万元，其中合肥市区-肥西-肥东开发型区域提供生态补偿资金最多，占所有开发区的 78.38%，其中合肥市区占 61.03%，是生态补偿资金的主要提供来源。其次是淮南市区支付占 9.93%；安庆市区支付占 8.39%；金安区最少，只占 2.99%。从获得补偿资金来看，金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地获得补偿资金分别占总额的 29.74%、31.04%，两者共占 60.78%，是获得生态补偿的主要区域。两大农业区共占 39.22%，提供的生态补偿为区域农业发展和扶贫提供了一定的资金来源。

5　讨论与结论

5.1　讨论

生态足迹和生态系统服务价值是本模型建立的生态经济学理论基础，目前这两大领域也是新兴研究热点，有关核算方法和系数目前尚未形成统一的标准[16-17]，因此，安徽大别山区生态足迹、生态系统服务价值的相关研究需要结合区域实际来探讨，这是对生态补偿核算方法和系数的具体应用与完善。借助生态足迹法、引力和生态流流转模型构建的生态补偿估算模型，相关指标获取能够结合区域实际，应用具有可操作性。本研究结果与前人相比，基本

表 3 研究区开发型区域支付和保护型区域生态补偿分配

Table 3 Payment in development areas and compensation distribution in reserves in the study area $\times 10^4$ ¥

开发区域 Development area	保护区域 Reserve				提供支付 Provided payment
	金寨-霍山水源地 Jinzhai-Huoshan water source	岳西-太湖-潜山水源地 Yuexi-Taihu-Qianshan water source	淮农主产区 Huai-nong main production area	长农主产区 Chang-nong main production area	
合肥市区-肥西-肥东 Hefei Urban Region-Feixi-Feidong	3 354.96	3 560.32	1 913.13	2 335.85	11 164.26
安庆市区 Anqing Urban Region	397.21	421.52	226.51	276.55	1 321.79
淮南市区 Huainan Urban Region	366.72	332.76	230.73	400.13	1 330.34
金安区 Jin'an Region	117.86	106.94	74.16	128.60	427.56
获得补偿总额 Total compensation	4 236.75	4 421.54	2 444.53	3 141.13	14 243.95

一致(结果稍偏小，主要是研究区域范围差别造成的)[23]，说明本研究模型是可行的。在本研究的生态补偿支付模型中，人均生态足迹、人均生态承载力、生态服务价值当量等参数更加细化、准确，可提高生态补偿测算的精度。但有关保护型区域和开发型区域距离使用几何中心点测算，与实际生态影响有一定的偏差(部分生态辐射范围不在研究区内)。本研究中金寨-霍山水源地在大别山的东北坡，岳西-太湖-潜山水源地在大别山的西南坡，受山脉阻隔，不同保护型区域提供给不同开发型区域的生态服务影响可能存在一定差异性。

通过跨学科(如 GIS 技术、生态学、环境经济学等)的综合研究[24]，进一步加强对生态补偿的标准、方式、政策等主要问题及新技术应用等研究；在补偿有科学依据、普遍接受的基础上，如何确定补偿系数制定更符合实际的补偿标准，都是未来继续研究的重点。安徽省大别山区跨流域主体功能区生态补偿的机制和政策还很欠缺，以上研究将进一步结合实际做深入探讨。

5.2 结论

1)根据主体功能区划和生态补偿的基本理论，及开发型区域提供保护型区域生态补偿的基本原则，安徽省大别山区及周围区域划分为合肥市区-肥东-肥西、安庆市区、淮南市区和金安区为生态补偿区(主体)，金寨-霍山水源涵养地、岳西-太湖-潜山水源地、淮河农业主产区和长江农业主产区为生态受偿区(客体)。

2)由生态资源需求量和经济发展水平构建开发型区域生态补偿支付模型，结合区域实际给予修正，测算出开发型区域支付生态补偿资金总额为 14 243.95 万元，各区分别为 11 164.26 万元(合肥市区-肥东-肥西)、1 321.79 万元(安庆市区)、1 330.34 万元(淮南市区)和 427.56 万元(金安区)。

3)保护型区域为开发型区域提供的生态服务价值分别为 5 512.33 万元(金寨-霍山水源地)、5 873.52 万元(岳西-太湖-潜山水源地)、3 392.04 万元(淮农主产区)和 4 785.13 万元(长农主产区)。

4)基于保护区提供的生态补偿价值比例及开发区支付的总量，保护型区域获得生态补偿分配量分别为 4 236.75 万元(金寨-霍山水源地)、4 421.54 万元(岳西-太湖-潜山水源地)、2 444.53 万元(淮农主产区)和 3 141.13 万元(长农主产区)。

由此可见，合肥市区-肥东-肥西、安庆市区、淮南市区，由于开发活动程度大，经济发展水平较高，由此计算的具体生态补偿标准，具有科学依据，应该率先向金寨-霍山水源地、岳西-太湖-潜山水源地进行生态补偿的支付，生态补偿标准为当地政府制定生态补偿政策提供科学依据和决策支持，以促进补偿机制的建立和完善主体功能区配套政策。同时对加强区域合作，使集中连片贫困区脱贫，促进安徽省大别山区科学协调发展，实现社会公平，构建和谐社会，促进生态文明建设。

参考文献 References

[1] 王毅. 开启我国自然生态保护新模式[EB/OL]. [2017-11-06]. http://theory.people.com.cn/n1/2017/1106/c40531-29628362.html
WANG Y. Open a new mode of natural ecological protection in China[EB/OL]. [2017-11-06]. http://theory.people.com.cn/n1/2017/1106/c40531-29628362.html

[2] 安徽省人民政府办公厅. 《安徽省人民政府办公厅关于健全生态保护补偿机制的实施意见》政策解读[EB/OL]. (2016-08-15)[2019-03-25]. http://www.ahjs.gov.cn/openness/detail/content/5a26772895542b0098339c26.html

Anhui Province People's Government Office. "The General Office of the People's Government in Anhui Province on Perfect Ecological Compensation Mechanism of the Implementation Opinions" policy interpretation[EB/OL]. (2016-08-15) [2019-03-25]. http://www.ahjs.gov.cn/openness/detail/content/5a26772895542b0098339c26.html

[3] 张化楠, 接玉梅, 葛颜祥. 国家重点生态功能区生态补偿扶贫长效机制研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12): 26–33
ZHANG H N, JIE Y M, GE Y X. Research on the mechanism of ecological compensation for poverty alleviation in the national key ecological function areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(12): 26–33

[4] 王凤春, 郑华, 王效科, 等. 生态补偿区域选择方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 176–182
WANG F C, ZHENG H, WANG X K, et al. Approaches to spatial targeting identification of payments for ecosystem services[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(1): 176–182

[5] 王璟睿, 陈龙, 张燚, 等. 国内外生态补偿研究进展及实践[J]. 环境与可持续发展, 2019, (2): 121–125
WANG J R, CHEN L, ZHANG Y, et al. Research progress and practice of ecological compensation in China and abroad[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, (2): 121–125

[6] 袁伟彦, 周小柯. 生态补偿问题国外研究进展综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 76–82
YUAN W Y, ZHOU X K. Review of research progress abroad in payments for ecosystem services[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(11): 76–82

[7] 郭年冬, 李恒哲, 李超, 等. 基于生态系统服务价值的环京津地区生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1473–1480
GUO N D, LI H Z, LI C, et al. Regional ecological compensation based on ecosystem service value in the area surrounding Beijing and Tianjin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1473–1480

[8] 李晓光, 苗鸿, 郑华, 等. 生态补偿标准确定的主要方法及其应用[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4431–4440
LI X G, MIAO H, ZHENG H, et al. Main methods for setting ecological compensation standard and their application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4431–4440

[9] 郭孟瑶. 基于生态足迹模型的川西北沙化地区生态补偿量化研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(6): 17–22
GUO M Y. A quantitative study on the ecological compensation standard in the desertified area of Northwest Sichuan based on ecological footprint model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(6): 17–22

[10] 范小杉, 高吉喜, 于勇. 基于生态补偿实施的 NSE 生态服务功能分类体系及应用模型[J]. 生态经济, 2007, (4): 35–39
FAN X S, GAO J X, YU Y. NSE classifying system of ecosystem service & its application model based on ecosystem compensation[J]. Ecological Economy, 2007, (4): 35–39

[11] 李宁, 米楠, 米文宝. 基于 GIS ESDA 的宁夏县域生态补偿空间分析[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(4): 55–58
LI N, MI N, MI W B. An analysis of county ecological compensation space in Ningxia based on GIS ESDA[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2014, 55(4): 55–58

[12] 徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 142–152
XU J, PAN H Y, HUANG P. Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 142–152

[13] 徐梦月, 陈江龙, 高金龙, 等. 主体功能区生态补偿模型初探[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1404–1408
XU M Y, CHEN J L, GAO J L, et al. Study on ecological compensation model for major function oriented zones[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1404–1408

[14] 谭佳音, 蒋大奎. 跨流域调水工程水源区生态补偿分摊 DEA 模型[J]. 统计与决策, 2019, 35(9): 33–37
TAN J Y, JIANG D K. DEA model for eco-compensation fund allocation in inter-basin water transfer projects[J]. Statistics and Decision, 2019, 35(9): 33–37

[15] 安徽省人民政府. 关于印发安徽省主体功能区规划的通知[EB/OL]. (2013-12-04). http://www.doc88.com/p-3317970230418.html
People's Government of Anhui Province. Notice on printing and distributing the main functional zone plan of Anhui Province[EB/OL]. (2013-12-04). http://www.doc88.com/p-3317970230418.html

[16] 郭荣中, 申海建, 杨敏华. 基于生态足迹和服务价值的长株潭地区生态补偿研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 70–78
GUO R Z, SHEN H J, YANG M H. Studies on ecological compensation based on ecosystem service value and ecological footprint in Chang-Zhu-Tan region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 70–78

[17] 熊兴, 储勇. 基于生态足迹的长江经济带生态补偿机制研究[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2017, 34(6): 94–102
XIONG X, CHU Y. Research on ecological compensation mechanism of the Yangtze River economic belt based on ecological footprint[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2017, 34(6): 94–102

[18] 郭贝贝, 杨绪红, 金晓斌, 等. 生态流的构成和分析方法研究综述[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1630–1639
GUO B B, YANG X H, JIN X B, et al. A review on the composition and analysis of ecological flow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1630–1639

[19] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚. 生态服务功能价值空间转移评价——以渭干河流域为例[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 1008–1014
QIAO X N, YANG Y J, YANG D G. Assessment of ecosystem service value transfer in Weigan River Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 1008–1014

[20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196

XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189–196

[21] 许典舟, 何如海, 阮梦雅, 等. 基于生态足迹的安徽省生态适度人口评价[J]. 辽宁工业大学学报: 社会科学版, 2018, 20(2): 22–25
XU D Z, HE R H, RUAN M Y, et al. Ecological moderate population evaluation in Anhui Province based on ecological footprint[J]. Journal of Liaoning University of Technology: Social Science Edition, 2018, 20(2): 22–25

[22] 季凌雪. 基于生态足迹模型的六安市可持续发展研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016
JI L X. Research on sustainable development of Lu'an City based on ecological footprint model[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016

[23] 胡淑恒, 施项, 季凌雪, 等. 安徽大别山区生态补偿量化研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(17): 4487–4490
HU S H, SHI X, JI L X, et al. The study of the payment amount of ecological compensation of Dabie Mountains in West[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(17): 4487–4490

[24] LI C, ZHENG H, LI S Z, et al. Impacts of conservation and human development policy across stakeholders and scales[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(24): 7396–7401