

基于碳汇的县南沟流域退耕林地补偿标准研究

王正淑¹, 王继军^{1,2*}, 刘佳¹

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 补偿标准是退耕还林生态补偿的核心与难点, 为探讨黄土高原退耕林地合适的补偿标准, 论文基于清洁发展机制的国际背景, 通过理论分析、实地测量与室内实验, 把碳汇价值与退耕农户的机会成本相结合, 构建了禁伐政策下退耕林地补偿标准的动态模型; 并选取黄土高原退耕的代表流域——县南沟进行实证分析, 依据退耕刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林特性确定退耕的一个补偿周期为37 a, 退耕地补偿过程与补偿标准分为两个阶段: 退耕1~17 a, 通过机会成本的计算, 补偿的可执行标准为1 997.26元/(hm²·a); 退耕18~37 a, 通过碳汇模型进行测算, 补偿的可执行标准为3 692.35元/(hm²·a)。人工刺槐纯林在补偿周期之后会逐渐出现灌木层和衰败现象, 因此, 这一补偿期结束后, 应根据林地生态群落的变化再行核算并完善其补偿标准。将碳汇价值纳入补偿体系, 能促使农民为提高碳汇产量自觉增强林地管护, 巩固退耕成果。

关键词: 补偿标准; 碳汇价值; 机会成本; 退耕林地; 县南沟流域

中图分类号: F326.2; F062.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2016)05-0779-10

DOI: 10.11849/zrzyxb.20150560

退耕还林第二轮补偿期即将结束, 对于补偿期结束之后是否需要补偿、补偿标准的高低, 目前观点不一, 未达成共识, 2014年国家又启动了新一轮的退耕计划, 这使得因地制宜地制定区域退耕补偿标准具有迫切的现实需求。补偿标准是退耕还林生态补偿的核心与难点^[1-2], 国内外关于退耕地补偿标准的研究主要集中于补偿标准的制定依据及具体数量。补偿标准的制定依据与计量方法目前主要有成本法、生态服务价值评估法、意愿法和协商博弈法, 如Dunn等认为美国自然保护计划(CRP)不仅可控制土壤流失, 还有其他多种生态服务效益, 在预定目标(控制土壤流失)实现之后政府应充分考虑生态效益来维持退耕成果^[3]; 美国的CRP项目将农民的受偿意愿与退耕成本相结合确定支付给申请农户的补偿标准^[4-5]; 哥斯达黎加的环境服务支付(PES)项目将退耕林地的机会成本作为补偿标准的制定依据^[6]; 秦艳红和康慕谊^[7]、孔凡斌^[8]亦认为可将退耕还林所造成的农民机会成本损失作为补偿标准。对于补偿标准具体数量的确定, 国内目前基于成本法研究的较多, 现行退耕地的补偿标准也是基于农民的经济损失而制定的, 对退耕地生态功能的公共产品性考虑不是很到位, 由于生态服务功能价值目前没有公认的较为准

收稿日期: 2015-05-20; 修订日期: 2015-09-11。

基金项目: 国家自然科学基金(41571515); 中国清洁发展机制基金赠款项目(2012027); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41571515; China Clean Development Mechanism (CDM) Grants Program, No. 2012027; “Twelfth Five-year” National Science and Technology Support Project, No. 2011BAD31B05.]

第一作者简介: 王正淑(1991-), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事碳汇与生态经济研究。E-mail: WANG454823759@163.com

***通信作者简介:** 王继军(1964-), 男, 陕西渭南人, 研究员, 主要从事生态经济研究。E-mail: jjwang@ms.iswc.ac.cn

确的计算方法及交易市场(买方),将生态服务功能价值纳入退耕地补偿标准的制定目前只处于理论初探阶段,研究相对滞后。

京都议定书提出清洁发展机制(CDM)之后,碳汇成为目前生态系统服务功能中唯一能够进行市场交易的“产品”,各国及国际组织用碳税法、造林成本法等对碳汇产品进行了定价,加之碳汇量的估算方法目前已形成成熟的理论体系,这使得目前将碳汇价值融入补偿标准的制定中具有一定的现实性和可操作性。因此本文基于碳汇的视角,将碳汇价值与机会成本相结合,构建黄土高原退耕地的补偿标准模型,并用退耕的典型代表流域——县南沟进行实证计算,以期为国家 and 地区因地制宜制定合理的退耕地补偿标准提供参考,同时为区域可持续发展提供借鉴。

1 研究区退耕概况及数据来源

1.1 研究区退耕概况

县南沟流域位于陕西省安塞县沿河湾镇(109°12'12"~109°22'12"E, 36°41'24"~36°46'12"N),在陕北黄土高原丘陵沟壑区具有典型的代表性,流域内梁峁起伏、地形破碎,流域面积50.64 km²;过去,由于过度开垦和放牧、以及半干旱的气候和疏松贫瘠的土质,使该区植被退化、水土流失严重、生态环境脆弱。作为退耕还林的试点流域,中国科学院、水利部水土保持研究所的科研人员在退耕还林(草)工程实施之前就在县南沟流域进行了长期的水土流失治理研究,在退耕还林(草)工程的实施过程中,县南沟流域认真落实“退耕还林(草)、封山绿化、以粮代赈、个体承包”的政策,截至2014年,流域共退耕还生态林634.14 hm²,荒山造林587.06 hm²,退耕还经济林136.69 hm²,退耕还生态林和荒山造林均为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林,退耕还林(草)工程使流域林草覆盖率显著提高,耕地:林地:草地面积由退耕初的1:0.65:3.71^[9]变为2014年的1:7.3:11.6,水土流失得到有效控制。

1.2 数据来源

补偿周期和碳汇价值的测算数据来自2014年8—10月的野外测量、采样及室内实验;1999年坡耕地农作物的单产数据、经济投入和作物价格数据来自课题组的调研历史积累。

2 研究思路与分析方法

2.1 研究思路

Pagiola和Platais认为制定森林保护的补偿标准时,森林保护导致的净收益损失应作为最低补偿,生态效益应作为最高补偿^[10];Engel等亦指出支付给生态系统管理者的补偿必须超过其他可供选择的土地利用类型(或原有土地利用类型)获得的收益,低于生态环境使用者获得的利益价值^[11]。

联合国气候变化纲要公约第三次缔约国大会通过具有约束力的京都议定书,提出京都机制为排放权交易(ET)、清洁发展机制(CDM)和联合减量(JI)^[12],其中CDM规定附件一国家和非附件一国家可采用清洁发展机制共同削减温室气体排放,同时议定书第3.3条规定1990年以后新植造林、再造林所吸收二氧化碳的净值,可作为CDM的排放减量值计算。Jotzo和Michaelowa预测附件一国家采用CDM的减排量可能占整个京都议定书规定减排量的32%^[13],提供排放减量权证(CER)的主要来源为中国与印度尼西亚^[14]。

这意味着我国退耕还林工程所固定的碳汇量可以通过清洁发展机制的CER与附件一国家进行碳汇贸易^[15-16], 并且碳汇贸易的市场潜力巨大。

退耕还林工程的土地为农民集体所有, 具有分散性, 不便于与附件一国家进行交易, 需要国家作为中间商, 国家向分散的退耕农户收购碳汇(即给退耕农户经济补偿), 汇总后通过CDM与附件一国家进行交易。

基于以上理论分析, 本文把国际社会公认的、可评估且可交易的碳汇价值作为退耕林地生态效益补偿的下限值, 并与退耕农户的机会成本相结合确定黄土高原退耕林地补偿的可实现标准, 在退耕前期, 碳汇价值低于机会成本, 应按农户退耕的实际经济损失进行补偿, 在退耕后期, 当碳汇收入高于机会成本时, 意味着完成了产业替代, 这个阶段补偿的下限值应为碳汇收益。

2.2 分析方法

2.2.1 生态林补偿标准模型

采用Moura-Costa和Wilson逐年领取补偿的情境^[17], 建立黄土高原退耕林地补偿标准的动态模型。补偿标准模型为:

$$S(t) = \text{Max}(FV_{st}, FV_{ct}) \quad (1 \leq t \leq 37) \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 为退耕第 t 年的补偿标准值; FV_{st} 为碳汇价值终值; FV_{ct} 为机会成本终值。

农户将退耕林碳汇出售给政府, 此时政府(买方)只需对产品付费, 不需对农户的造林成本付费, 参照Olschewskia的CER价格模型^[11]与柳婉郁和林国庆的碳汇收入模型^[18], 确定碳汇价值模型为:

$$FV_{st} = (1+r)^t \cdot \Delta b(t) \cdot P_b \quad (2)$$

式中: $\Delta b(t)$ 为碳汇年增量(Mg); P_b 为碳汇价格(元/Mg); r 为利率; t 为退耕年限。

机会成本即农户因退耕而放弃原有粮食作物种植而造成的经济损失加上植树造林的成本, 机会成本模型为:

$$FV_{ct} = (1+r)^t \cdot \sum_{i=1}^m \left(O_i \cdot P_i - \sum_{j=1}^n C_{ij} \right) \cdot A_i \cdot I + (1+r)^t \cdot C_f \cdot \sum_{i=1}^m A_i \quad (3)$$

式中: i 为某坡耕地种植作物的种类; O 为作物单产(kg/hm²); P 为作物价格(元/kg); C 为作物的经济投入(元); j 为每种作物经济投入的种类, 如化肥、农药、机械等; A 为种植面积(hm²); I 为复种系数; C_f 为造林成本(元/hm²)。

2.2.2 生态林退耕补偿周期

黄土高原水资源匮乏, 刺槐耗水性特强, 致使人工栽培的刺槐林在生长到30~40 a的时候, 因得不到充足的养分和水分, 大部分刺槐林开始出现病虫害和“小老树”现象, 严重的甚至枯死^[19]。当刺槐林生长极其缓慢或停止生长时, 政府应改变禁伐的退耕政策, 探寻新的退耕方案, 禁伐下的补偿期也到此结束。通过野外实地测量与已有资料的结合, 可建立当地刺槐胸径、树高随树龄的生长模型, 以及刺槐单株生物量的连年生长量和平均生长量的动态变化曲线, 从而求得刺槐进入“老龄”的年限, 即为生态林一个退耕补偿周期的时间。

2.2.3 实验方法

由于学者对退耕还林后土壤碳的增减存在很大分歧^[20-21], 因此本文只测算植被碳和枯落物碳, 县南沟流域现有退耕刺槐林未出现灌木层, 在林地样方设置时, 仅设置乔木样

方、林下草样方和凋落物样方。根据安塞县退耕办提供的图纸及林地的差异性与代表性,寻找不同造林时期立地条件和立地质量基本一致的刺槐林样地,选定县南沟流域1995、1999、2000、2002、2004年等时点及相邻的瓦树塌村1976年栽植的刺槐林作为调查对象,每一退耕时点选取阴阳坡两片刺槐林地,每片林地分别布设3个10 m×10 m乔木样方,每个乔木样方内布设3个1 m×1 m草本样方和3个1 m×1 m凋落物样方(表1)。

表1 刺槐样地基本情况

Table 1 Basic condition of *Robinia pseudoacacia* sample plot

地名	林龄/a	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	坡向	坡度/(°)	密度/(株/hm ²)	乔木样方数
方家河	10	109.339 0	36.722 0	1 188.4	阴	30	1 400	3
方家河	10	109.319 7	36.737 5	1 157.1	阳	28	1 400	2
寨子湾	12	109.247 3	36.708 5	1 270.9	阳	30	1 267	3
寨子湾	12	109.246 9	36.709 7	1 254.3	阴	17	1 267	3
方家河	14	109.342 0	36.732 0	1 211.0	阳	31	1 433	3
方家河	14	109.341 0	36.732 0	1 205.8	阴	33	2 100	3
方家河	15	109.342 0	36.733 0	1 197.3	阳	19	1 800	3
方家河	15	109.341 0	36.731 0	1 215.3	阴	24	1 600	3
孙岔	19	109.271 9	36.716 1	1 144.8	阴	15	1 000	3
瓦树塌	38	109.253 0	36.748 9	1 134.6	阴	14	1 100	3

于2014年8—10月进行野外测定与采样。在乔木样方内对胸径>4 cm的刺槐进行每木检尺:用胸径尺测胸径、激光测距仪测树高,测量的同时,每一样地选取一株具有代表性的刺槐,采集刺槐干、枝、叶、皮、根,用生长锥钻取树干;用高枝剪在阴阳两个方向的上、中、下3个部位采集树枝和树叶;用部分挖掘法采树根,植物样品带回实验室风干后用球磨机研磨,采用重铬酸钾-外加热容量法测刺槐各组分的含碳率。对林下草样方进行植物种类、盖度和高度的调查后,将草本地上部齐地刈割,凋落物样方中的凋落物采用全部收获法,将草本和凋落物带回实验室称鲜重,然后在65℃下烘干至恒重,称干重。

2.2.4 碳汇量测算方法

本文计算的退耕林碳汇量包括乔木固碳、林下草固碳和凋落物固碳,碳汇量采用生物量法计算,生物量乘以含碳率为固碳量。实验获得林下草地上生物量,利用给定的根冠比计算其地下生物量^[22],由于实验采样是在夏末秋初,根冠比采用一年中的最低值2.02:1^[23]。含碳率引用IPCC 2006的推荐值,草本植物、凋落物的含碳率分别为0.47、0.37^[24]。

对县南沟林龄10、12、14、15、19、29 a和邻近的纸坊沟林龄25、33、38 a刺槐林的林分密度调查发现,退耕人工刺槐林自然稀疏现象不明显,林分密度与栽植初的存活密度基本一致,于是请教长期研究安塞县刺槐林的侯庆春和侯喜录研究员等人,探讨结果是:人工刺槐林栽植时的株行距、单株大小相同,导致刺槐个体营养空间一致,外界生长条件均匀,且在无人干扰的情况下,难以成功地繁殖扩散,所以在调查的林龄内自然稀疏规律不显著,林分密度主要取决于栽植初的存活密度。因此单株碳汇量与存活密度相乘即为刺槐单位面积碳汇量,刺槐单株碳汇量由干、枝、叶、皮、根生物量与实验测定的干、枝、叶、皮、根的含碳率相结合得到,其中刺槐生物量的测算采用国家林

业局公布的刺槐异速生长方程^[25] (表2)。

2.2.5 碳汇价格与机会成本参数的确定

确定碳汇价格的方法目前主要有碳税率法、造林成本法、人工固定CO₂成本法、温室效应损失法和避免损害费用法等，国内多用碳税法^[26]和造林成本法^[26]，欧阳志云等比较运用两种方法，评估中国陆地生态系统碳汇的间接经济价值，结果显示碳税法计算的碳汇价值约为造林成本法计算的10倍^[27]，可见碳税法估算的价值量过高，因此本文取碳税法^[26]和造林成本法价格的均值作为流域退耕林碳汇的单价^[28]。碳税率采用国家林业局2008年推荐使用的价格1200元/Mg^[10]，造林成本采用国家林业局1990年公布的数据240.03元/m³，换算后为260.9元/Mg^[29]，将碳税率、造林成本用每年的通货膨胀率调整为1999年的物价水平，分别为1012.26、521.00元/Mg，历年通货膨胀率数据来源于国家统计局网站^[30]。

机会成本包括农户因退耕而放弃原有粮食作物种植造成的经济损失和造林成本两部分。退耕之前流域内坡耕地主要种植谷子、糜子等粮食作物，因土壤贫瘠、水土流失严重，加之广种薄收的耕作方式，使得粮食单产低^[31]，1999年，坡耕地谷子、糜子单产分别为1800、1198.5 kg/hm²，谷子、糜子的单价分别为1、1.1元/kg；坡耕地谷糜种植的生产投入只有种子和少量化肥，谷子、糜子的投入成本分别为411.20、124.35元/hm²；县南沟流域作物的复种指数为1；每年农民对粮食作物种植面积比例的选取具有随机性，不可预测，为便于计算，假设坡耕地上每种作物种植面积相等。造林成本主要包括种苗费和管护费，按现行标准，种苗费为750元/hm²，管护费为300元/(hm²·a)，种苗费在退耕的第一年一次性补偿。

利率取1999—2014年金融机构人民币存款基准利率的均值，为3%，基准利率来自中国人民银行官网^[32]。

3 研究结果

3.1 退耕补偿周期

野外测量结果表明，由于阴坡蒸发量少于阳坡，土壤水分条件优于阳坡，同一树龄，刺槐阴坡的胸径、树高均略高于阳坡，取阴阳坡的平均值作为对应树龄的胸径、树高。采用理查德生长方程对树龄与胸径(DBH)、树龄与树高进行非线性回归(图1)，得到：

刺槐胸径生长模型为：
$$D = 17.05(1 - e^{-0.038t})^{0.788} \quad (R^2 = 0.998) \quad (4)$$

刺槐树高生长模型为：

表2 刺槐各组分异速生长方程和含碳率均值
Table 2 Allometric equations and carbon contents of different parts of *Robinia pseudoacacia*

器官	异速生长方程	各树龄含碳率均值
树干	$W_T = 0.02583 \times (D^2 H)^{0.6841}$	0.453
树枝	$W_B = 0.00464 \times (D)^{3.2181}$	0.477
树叶	$W_L = 0.02340 \times (D)^{1.9277}$	0.470
树皮	$W_P = 0.00763 \times (D^2 H)^{0.0447}$	0.473
树根	$W_R = 0.01779 \times (D)^{2.6448}$	0.459

注：W为生物量(kg/株)；T、B、L、P、R分别表示干、枝、叶、皮、根；D为胸径(cm)；H为树高(m)。

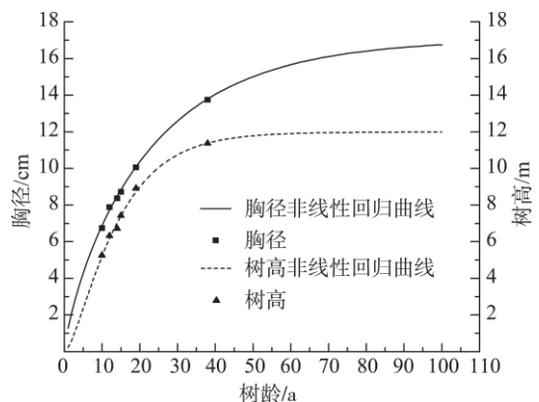


图1 胸径、树高非线性回归模型

Fig. 1 Nonlinear regression model of DBH and height of tree

$$H = 11.983(1 - e^{-0.091t})^{1.622} \quad (R^2 = 0.993) \quad (5)$$

式中： t 为树龄（a）。

刺槐胸径和树高生长模型与异速生长方程相结合，对研究区刺槐单株生物量的连年生长量和平均生长量随树龄的动态变化进行计算和预测^[33]，结果见图2。

由县南沟流域刺槐的胸径和树高生长曲线（图1）、生长量变化曲线（图2）可知：树龄37 a时生物量的连年生长量与平均生长量相交，37 a之后生物量的连年生长量低于平均生长量（图2），生物量增长变得极为缓慢；37 a亦是胸径、树高由快速生长向缓慢生长的过渡（图1），此时刺槐林已经达到过熟林，进入“老龄”阶段。因此将流域内退耕刺槐林的一个补偿周期设定为37 a，这与县南沟流域刺槐林的实际情况亦相符。根据对当地年老者和长期监测本流域刺槐林老专家的调研，县南沟流域刺槐林林龄在30~40 a时，便逐渐出现衰败现象，于是农户对该林龄段的刺槐林进行了皆伐，因此该流域没有超过该林龄段的刺槐林。

3.2 退耕补偿标准

3.2.1 碳汇量

实验测得刺槐不同树龄干、枝、叶、皮、根的含碳率相差不大，因此，在计算刺槐各组分的固碳量时用各树龄干、枝、叶、皮、根含碳率的均值（表2）。刺槐胸径和树高生长模型与异速生长方程相结合，可建立刺槐单株生物量与树龄的函数，生物量函数与含碳率相结合可建立刺槐单株碳汇量与树龄的动态模型，如下式所示：

$$C_i = 0.453W_T(t) + 0.477W_B(t) + 0.470W_L(t) + 0.473W_P(t) + 0.459W_R(t) \quad (6)$$

式中： C_i 为刺槐单株碳汇量（kg C）；0.453、0.477、0.470、0.473、0.459分别为刺槐干、枝、叶、皮、根各树龄含碳率的均值。

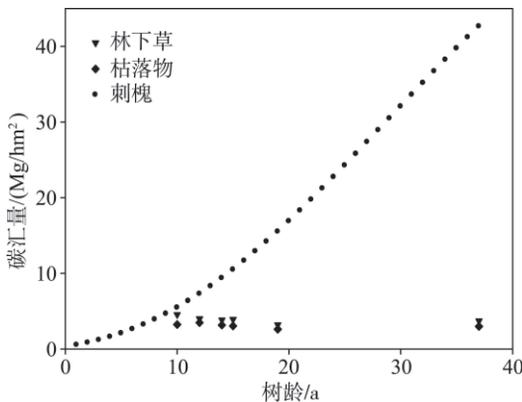


图3 刺槐林碳汇量

Fig. 3 Annual carbon sequestrations in different parts of forest

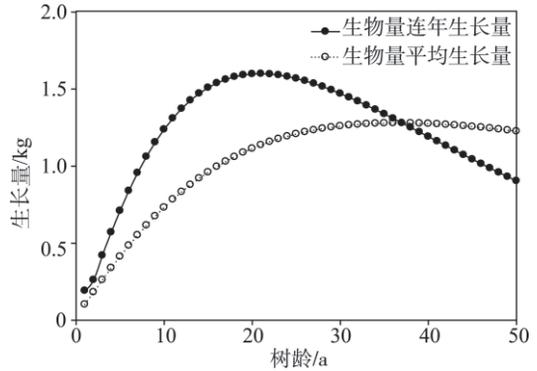


图2 刺槐生物量生长量动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of the *Robinia pseudoacacia* biomass growth

将县南沟流域退耕栽植时刺槐存活密度的均值（1 492 株/hm²）设定为本文的林分密度，林分密度与单株碳汇量模型结合对刺槐单位面积碳汇量随林龄的变化进行计算和预测。实验结果（图3）表明林下草、枯落物碳汇的年际变化不大且无明显规律。

3.2.2 碳汇价值终值与机会成本终值

将流域退耕刺槐林碳汇年增量、1999年碳汇价格766.63元/Mg、利率3%代入公式（2），得到随林龄变化的碳汇价值终值（图4）。将上文确定的机会成本各项参数代

入公式(3), 得到随退耕年限变化的机会成本终值(图4)。

3.2.3 可实施补偿标准的确定

县南沟流域刺槐林林龄1~17 a间, 机会成本大于碳汇价值; 18~37 a间, 碳汇价值大于机会成本, 因此在一个补偿周期内, 补偿过程与补偿标准可分为两个阶段: 第一阶段, 退耕1~17 a, 补偿退耕林地的机会成本, 如果每年等额补偿, 则可实施的补偿额度为1 997.26元/(hm²·a); 第二阶段, 退耕18~37 a, 碳汇价值大于机会成本, 表明土地的碳汇生产替代粮食生产, 产业更替已经完成, 土地对农民的直接贡献为碳汇收益, 将碳汇收益作为补偿标准, 补偿主客体均是可以接受的, 如果每年等额补偿, 则可实施的补偿额度为3 692.35元/(hm²·a)。

总的而言, 在整个封山育林期(1~37 a)的两个补偿阶段, 政府共需向退耕农户补偿107 800.36元/hm², 而政府可获得的碳汇收益为96 484.81元/hm², 碳汇收益占补偿金总额的比例为89.50%。

4 结论与讨论

本研究基于清洁发展机制的国际背景, 选取碳汇作为退耕林地生态效益补偿的下限值, 把碳汇价值与退耕农户的机会成本相结合, 构建了基于碳汇生产下黄土高原退耕林地补偿标准的动态模型。并选取黄土高原的一个典型代表流域——县南沟进行实证, 通过实地测量、室内实验和以及历史资料的收集, 依据流域退耕刺槐林特性确定退耕的一个补偿周期为37 a, 补偿过程与补偿标准可分为两个阶段: 退耕1~17 a, 可执行补偿标准为1 997.26元/(hm²·a); 退耕18~37 a, 可执行补偿标准为3 692.35元/(hm²·a)。

基于碳汇视角确定退耕林地的补偿标准, 对于完善退耕林地的补偿体系将有一定的作用, 得出的黄土高原退耕林地补偿标准的一般性结论, 能为国家和地区因地制宜地制定补偿政策提供借鉴。同时, 将碳汇经济显化, 纳入生态补偿体系, 有利于碳汇产业的发展^[34], 可促使作为理性“经济人”的农民为追逐经济效益^[35], 自觉提高林木质量、增强林地管护, 从而增加碳汇产量; 国家向退耕农民购买碳汇后(支付补偿金), 与附件一国家进行交易, 附件一国家购买碳汇而获得排放减量权证, 是碳汇产业化很好的开端。

本研究主要是为退耕林地探索一种可借鉴的补偿路径, 构建的补偿标准动态模型是基于可测量且可交易的退耕林碳汇, 当退耕林的其他外部性公共生态产品有国际社会公认的测算方法及交易市场之后, 补偿标准会有所提高。此外, 基于碳汇的具体补偿标准值受交易价格、林木生长特性、国际气候谈判、农地撂荒等各种因素的综合影响, 在今后的实际运用中, 应认真审视各可变因素的影响, 对这一标准进行修正。

实地调查及咨询专家表明, 县南沟流域退耕人工刺槐林在一个补偿周期内未发现林分有明显自然稀疏现象, 为进一步验证这一结果, 使林分生物量测算更准确, 需对黄土高原丘陵沟壑区其他区域作进一步调查, 以验证或完善该研究区所得的相关结论。

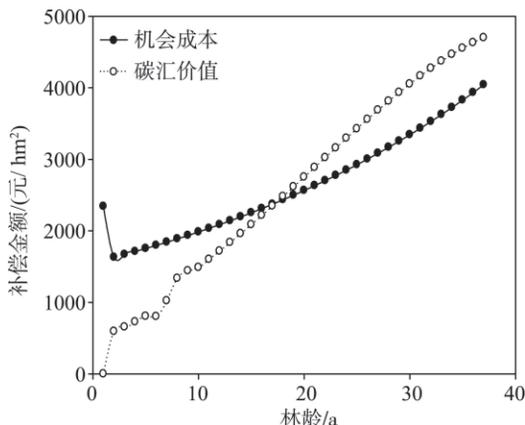


图4 补偿标准

Fig. 4 Compensation standard

对县南沟邻近流域纸坊沟人工刺槐成熟林和过熟林的野外实地踏查发现,在此补偿周期之后,人工刺槐纯林逐渐出现灌木层;或出现干梢死亡、病虫害、“小老树”等衰败现象^[9],因此这一补偿期结束之后,在新的生物群落复合系统下,应进一步进行核算,完善补偿标准。

参考文献(References):

- [1] 喻永红. 退耕还林生态补偿标准研究综述 [J]. 生态经济, 2014, 30(7): 47-50. [YU Y H. Review on the standard of payment for environmental services of the grain for green program. *Ecological Economy*, 2014, 30(7): 47-50.]
- [2] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚, 等. 流域生态补偿标准的确定——以渭干河流域为例 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1666-1676. [QIAO X N, YANG Y J, YANG D G, et al. Standards of payments for ecosystem services in watershed: Taking Weigan River Basin as an Example. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1666-1676.]
- [3] DUNN C P, STEARNS F, GUNTENSPERGEN G R, et al. Ecological benefits of conservation reserve program [J]. *Conservation Biology*, 1993, 7(1): 132-139.
- [4] 刘嘉尧, 吕志祥. 美国土地休耕保护计划及借鉴 [J]. 商业研究, 2009(8): 134-136. [LIU J Y, LÜ Z X. Plan to protect the land fallow in U.S. and inspiration for China. *Commercial Research*, 2009(8): 134-136.]
- [5] 艾春艳, 张世秋, 陶文娣, 等. 美国自然保护计划对中国退耕还林后续政策的启示 [J]. 林业经济, 2008(2): 70-75. [AI C Y, ZHANG S Q, TAO W D, et al. The inspiration to grain for green project in China by the conservation reserve program policy after contracts expiration in USA. *Forestry Economics*, 2008(2), 70-75.]
- [6] KALACSKA M, SANCHEZ-AZOFEIFA G A, RIVARD B, et al. Baseline assessment for environmental services payments from satellite imagery: A case study from Costa Rica and Mexico [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88: 348-359.
- [7] 秦艳红, 康泰谊. 国内外生态补偿现状及其完善措施 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 557-567. [QING Y H, KANG M Y. A review of ecological compensation and its improvement measures. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 557-567.]
- [8] 孔凡斌. 退耕还林(草)工程生态补偿机制研究 [J]. 林业科学, 2007, 43(1): 65-101. [KONG F B. Research on eco-economic compensation system for conversion of cropland to forest project (CCFP) in China. *Forestry Economics*, 2007, 43(1): 65-101.]
- [9] 顾文. 基于CDM的县南沟流域商品型生态农业系统优化结构研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 1. [GU W. The Study on the Optimized Structure of Ecological Agricultural System with Commodity Based on CDM in Xiannangou Watershed. Master Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 1.]
- [10] PAGIOLA S, PLATAIS G. Payments for Environmental Services: From Theory to Practice [M]. Washington: World Bank, 2007.
- [11] OLSCHESKI R, BENÍTEZ P C, DE KONING G H J, et al. How attractive are forest carbon sinks? Economic insights into supply and demand of certified emission reductions [J]. *Journal of Forest Economics*, 2005, 11: 77-94.
- [12] IPCC. Kyoto Protocol [EB/OL]. [2015-04-21]. http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php.
- [13] JOTZO F, MICHAÉLOWA A. Estimating the CDM market under the Bonn Agreement [R]. HWWA Discussion Paper, No.145, 2001.
- [14] TREXLER M C, HAUGENC. Keeping it Green: Opportunities for Mitigating Climate Change [M]. Washington D C: World Resources Institute, 1995.
- [15] 林国庆, 柳婉郁. 因为二氧化碳排放减量策略下最适造林面积之经济分析 [R]. 台湾经济学会, 2005: 12. [LIN G Q, LIU W Y. Economic analysis of the optimal afforestation area based on carbon dioxide emission reduction strategy. *Taiwan Economic Association*, 2005: 12.]
- [16] WILMAN E A, MAHENDRARAJAH M S. Carbon offset [J]. *Land Economics*, 2002, 78(3): 405-416.
- [17] COSTA M P, WILSON C. An equivalence factor between CO₂ avoided emissions and sequestration—Description and applications in forestry [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2000(5): 51-60.
- [18] 柳婉郁, 林国庆. 地主参与碳汇方案与机制之经济分析 [D]. 台北: 台湾大学, 2008. [LIU W Y, LIN G Q. The Economic Analysis of Landowners' Participation in Carbon Sequestration Programs and Mechanisms. Taipei: Taiwan Uni-

- versity, 2008.]
- [19] 张长庆, 张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 135-144. [ZHANG C Q, ZHANG W H. A study on asexual reproduction and regeneration of *Robinia pseudoacacia* plantations in different habitats in hilly area of the Loess Plateau. Journal of Northwest A & F University, 2009, 37(1): 135-144.]
- [20] HUNTINGTON T G. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the Southeastern USA [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(5): 1459-1467.
- [21] VESTERDAL L, RITTER E, GUNDERSEN P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1/2): 137-147.
- [22] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286. [LIU Y C, WANG Q F, YU G R, et al. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4277-4286.]
- [23] 李旭东, 张春平, 傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素 [J]. 草业学报, 2012, 21(4): 307-312. [LI X D, ZHANG C P, FU H. Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(4): 307-312.]
- [24] The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI) of the IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [Z]. Japan: The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, 2006.
- [25] 国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室. 造林项目碳汇计量与监测指南 [M]. 北京: 林业出版社, 2008. [State Forestry Administration. Guidelines for Carbon Accounting and Monitoring. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.]
- [26] 谢高地, 李士美, 肖玉, 等. 碳汇价值的形成和评价 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 1-10. [XIE G D, LI S M, XIAO Y, et al. Value of carbon sink: Concept and evaluation. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 1-10.]
- [27] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统生态服务功能及其生态经济价值的初步研究 [J]. 生态学报, 1999, 19(15): 608-613. [OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. Acta Ecologica sinica, 1999, 19(15): 608-613.]
- [28] 周萍, 刘国彬. 黄土丘陵区流域生物量和气体调节服务功能价值动态变化及评价 [J]. 生态经济, 2008, 35(3): 26-31, 35. [ZHOU P, LIU G B. Dynamic change and ecosystem service value evaluation of watershed biomass and gas regulation in hilly-gullied loess region. Ecological Economy, 2008, 35(3): 26-31, 35.]
- [29] 国家林业局. 中国林业统计年鉴 [M]. 北京: 林业出版社, 1990. [State Forestry Administration. China Forestry Statistical Yearbook. Beijing: China Forestry Publishing, 1990.]
- [30] 中华人民共和国国家统计局. <http://data.stats.gov.cn/search/keywordlist2> [EB/OL]. (2010-11-11)[2015-04-20]. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. <http://data.stats.gov.cn/search/keywordlist2>. (2010-11-11) [2015-04-20].]
- [31] 中国科学院、水利部西北水土保持研究所, 等. 黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究 [M]. 杨凌: 天则出版社, 1990. [Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, et al. Study on Ecological Agriculture with Soil and Water Conservation in Loess Hilly Gully Region. Yangling: Tianze Press, 1990.]
- [32] 货币政策司. 金融机构人民币存款基准利率 [EB/OL]. (2014-11-18) [2015-04-21]. http://www.pbc.gov.cn/publish/zhengcehuobisi/629/2014/20141128102100157180391/20141128102100157180391_.html. [Monetary Policy Department. Financial institutions renminbi deposit benchmark interest rates. (2014-11-18)[2015-04-21]. http://www.pbc.gov.cn/publish/zhengcehuobisi/629/2014/20141128102100157180391/20141128102100157180391_.html.]
- [33] 张建军, 徐佳佳, 李慧敏. 水土保持林生长过程及碳密度的动态变化 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 70-76. [ZHANG J J, XU J J, LI H M. Growth process of soil and water conservation forest and dynamic change of its carbon intensity. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 70-76.]
- [34] 洪玫. 森林碳汇产业化初探 [J]. 生态经济, 2011(1): 113-115, 124. [HONG M. The primary research on industrialization of forest carbon sinks. Ecological Economy, 2011(1): 113-115, 124.]
- [35] 程姝. 城镇化进程中农民工市民化研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学经济管理学院, 2013. [CHENG S. The Study of Rural Labors' Migration in the Process of Urbanization. Harbin: College of Economics and Management of Northeast Agricultural University, 2013.]

Study on the Compensation Standard of Returning Farmland to Forest in Xiannangou Watershed from the Perspective of Carbon Sink

WANG Zheng-shu¹, WANG Ji-jun^{1,2}, LIU Jia¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Quantitatively formulating compensation standard is a core and difficulty to establish ecological compensation mechanism. In order to explore appropriate compensation standard for returning farmland to forest and provide reference for national and regional compensation policy formulation in the Loess Plateau, in the international background of the Clean Development Mechanism and logging ban policy, this paper builds a dynamic model of compensation standard for returning farmland to forest by combining value of carbon-sink with farmer's opportunity cost. Through theoretical analysis and field measurements, combined with laboratory experiments, we made an empirical study of the representative watershed—Xiannangou Watershed on the Loess Plateau. The compensation cycle is determined to be 37 years according to the growth characteristics of the *Robinia pseudoacacia* forest in the Xiannangou Watershed. The compensation process and standard are divided into two stages. During the 1st–17th years of returning farmland to forest, when the farmer's opportunity cost is greater than the value of carbon-sink, we should compensate for the actual economic loss of farmers. Executable standard of compensation is 1 997.26 yuan/(hm²·a) according to the opportunity cost. During the 18–37th years of returning farmland to forest, the value of carbon-sink is greater than the farmer's opportunity cost, which means that the industry substitution has completed. Executable standard of compensation is 3 692.35 yuan/(hm²·a) according to carbon sink model. In summary, the value of carbon-sink accounts for 89.50% of the total compensation in the compensation period. Artificial *Robinia pseudoacacia* forest will gradually generate shrubs and decline after the compensation period, therefore, the compensation standard should be calculated and perfected again in accordance with the change of forestland ecological community after the compensation period finished. Involving the value of carbon-sink into the compensation system can push farmers to manage and protect forestland consciously for improving the carbon sink production, which is beneficial to consolidate the achievements of the Grain for Green Program on the Loess Plateau.

Key words: compensation standard; value of carbon-sink; opportunity cost; returning farmland to forest; Xiannangou Watershed