

黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值

王彦武^{1,2}, 牛莉婷¹, 张峰¹, 高金芳¹, 陈天林³, 王莉¹

(1.甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020; 2.甘肃省水利厅兰州水土保持科学试验站, 兰州 730021; 3.甘肃省水利厅水土保持局, 兰州 730000)

摘要: 研究黄土区高标准梯田生态服务功能的变化特征, 探讨坡改梯工程对高标准梯田生态服务功能价值的影响趋势和潜力, 可为黄土丘陵区探索低投入、高效用和可持续农业发展模式提供理论基础。在庄浪县采用机会成本法和影子工程法等生态经济学方法, 界定了黄土区高标准梯田的生态服务功能, 选取土壤肥力保持功能、水土保持功能、土壤水分涵养功能 3 类生态服务功能, 构建了高标准梯田生态功能的物质质量模型和价值量模型, 评估了高标准梯田的生态服务功能和价值。结果表明: 每公顷高标准梯田每年为人类提供了约 119 667.00 kg 的总物质量和 114 046.53 元的生态服务总价值, 其生态功能价值可观; 庄浪县坡耕地和高标准梯田的水土流失量分别为 82.76、0.05 t/(hm² · a), 高标准梯田的水土保持量为 82.71 t/(hm² · a), 坡耕地改造成高标准梯田对生态服务功能的价值有显著影响; 高标准梯田单位面积的水土保持功能价值为 3 831.67 元/(hm² · a), 远低于土壤肥力保持功能价值(88 869.52 元/(hm² · a))和土壤水分涵养功能的价值(24 239.20 元/(hm² · a)), 高标准梯田水土保持功能还有很大的提升空间和升值潜力, 应通过梯田产业结构调整, 选择合适的经营发展模式, 提高梯田单位面积收益, 最大限度发挥高标准梯田的水土保持功能。黄土区高标准梯田建设在国民经济发展过程中具有重要的生产、生态和生活功能特征, 文中为高标准梯田的生态功能价值核算提供了较为全面的评估方法, 研究结果有利于完善黄土区高标准梯田建设过程中生态功能的价值核算方法, 最大限度发挥其生态效益, 同时挖掘潜在的生态功能和价值, 从而实现高标准梯田生态系统的可持续发展。

关键词: 黄土区; 高标准梯田; 生态服务功能; 生态服务价值; 价值评估

中图分类号: S157.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0190-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.027

Ecological Service Function and Its Value of High-standard Terrace in Loess Region

WANG Yanwu^{1,2}, NIU Liting¹, ZHANG Feng¹, GAO Jinfang¹, CHEN Tianlin³, WANG Li¹

(1.Gansu Institute of Soil and Water Conservation Sciences, Lanzhou 730020; 2.Lanzhou Test Station of Soil and Water Conservation Sciences, Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730021; 3.Soil and Water Conservation Bureau, Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000)

Abstract: Studying the change characteristics of high-standard terrace ecological service function in loess region, discussing influence trend and potential of the project of changing mountain slop into terrace on functional value of high-standard terrace ecological service, can provide a theoretical basis for exploring the model of low input, high efficiency and sustainable agricultural development in loess hilly region. The study defined the ecological service function of high-standard terrace with opportunity cost method and shadow engineering method in Zhuanglang county. On the basis of soil fertility maintenance function, soil and water conservation function, and soil moisture conservation function, this paper built the model of material quality and value of ecological service function, and assessed ecological service function and value of high-standard terrace. The results showed: firstly, each hectare of high-standard terrace annually provided the total mass and value of ecological service for human beings respectively about 119 667.00 kg and 114 046.53 yuan, the value of ecological function was considerable. Secondly, soil erosion amount of sloping farmland and high-

收稿日期: 2019-05-13

资助项目: 甘肃省科技计划项目(18YF1FA032); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(甘水科外发 2017-76-1&2); 甘肃省水土保持补偿费项目

第一作者: 王彦武(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wang_yanwu@163.com

通信作者: 张峰(1975—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事水土保持与生态监测研究。E-mail: zhangfeng_lz@163.com

standard terrace was respectively $82.76 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $0.05 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, the amount of soil and water conservation of high-standard terrace was $82.71 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, and the transformation of sloping farmland into high-standard terrace had a significant impact on the value of ecological service function. Thirdly, the value of soil and water conservation function of high-standard terrace unit area was $3\,831.67 \text{ yuan}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, far below the value of soil fertility maintenance function which was $88\,869.52 \text{ yuan}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and the value of soil moisture conservation function which was $24\,239.20 \text{ yuan}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. There is still a lot of room for improvement and appreciation potential in the function of soil and water conservation in high-standard terrace, adjusting the industrial structure of terrace, selecting appropriate operation and development mode, improving the yield per unit area, and giving full play to the function of high-standard terrace. The construction of high-standard terrace has important features of production, ecology and living functions in the process of national economic development. The study provides a comprehensive evaluation method for the ecological function value accounting of high-standard terrace, and the results are helpful to improve the value accounting method of ecological function, maximize its ecological benefits, also excavate the potential ecological function and value, so as to realize the sustainable development of high-standard terrace ecosystem.

Keywords: loess region; high-standard terrace; ecological service function; ecological service value; value assessment

高标准梯田是在丘陵区坡地上沿等高线修筑的水平条状台阶式或波浪式断面且顺坡沿等高线呈梯状排列的田地^[1],其田面平整,埂坎坚固,集中连片,成一定规模,具备完善的灌排设施和田间道路,系统内部稳定,并与外部协调,能够抵御干旱、大风、洪涝等自然灾害,是黄土高原地区基本农田的重要组成部分^[2]。刘鸣达等^[3]将农田生态系统服务功能归纳为生产功能、生态功能和生活功能,高标准梯田作为基本农田的子类也具有“三生”功能的特征。人类在当前面临资源短缺、生态环境日趋恶化的情况下,高标准梯田生态系统提供的粮食生产、控制侵蚀和保肥保土等服务功能发挥着越来越重要的作用。粮食生产能力作为梯田的生产功能其价值已得到广大群众的认可,但是对保肥保土和水分涵养等生态功能的价值没有清晰的认识,因此,本文主要对“三生”功能中的生态功能价值进行分析。低标准梯田和坡耕地改造提升为高标准梯田的潜力巨大,改造后如何提升其生态服务功能显得十分必要,尤为迫切。因此,研究高标准梯田生态服务功能及其价值成为黄土丘陵区探索低投入、高效用和可持续农业发展模式的关键。目前,学者们对农田生态系统服务功能的研究绝大多数从土地利用变化转型^[4-7]、高标准农田建设的提升潜力^[8-9]、水土保持措施效果^[10-11]、种植模式与施肥效用^[12-15]等角度进行分析,而对梯田生态系统服务功能的研究较少^[16-18],尤其是有关黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值方面的研究,目前还未见报道。

高标准梯田在治理水土流失、改善农业基础条件的过程中起着重要的作用,它不但可以拦蓄水土、保土增肥,而且对扩产增收、调整产业结构有重要影响。

然而,随着高标准梯田的建设,其生态服务功能及其价值如何量化?低标准梯田和坡耕地改造成高标准梯田对生态服务功能的价值是否有显著影响?高标准梯田的生态服务功能及其价值的变化趋势和潜力如何?上述问题的研究将对进一步分析黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值奠定基础。为此,本研究通过定性分析和定量评价的方法,对黄土区庄浪县高标准梯田主要的生态服务功能及其价值进行评估,探讨各生态服务功能的经济价值变化趋势和潜力,以直观反映黄土区坡改梯和高标准梯田建设等生态修复工程的效果,为保护、恢复和治理黄土丘陵区生态环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庄浪县隶属于甘肃省平凉市,位于甘肃中部,六盘山西麓,属黄土高原丘陵沟壑区,是全国生态建设示范县和第一个实现梯田化的模范县,境内有梁崮 402 道,沟壑 2 500 条,海拔 1 405~2 857 m。研究区为典型的大陆季风气候,多年平均降水量 528 mm,且多集中在 7、8、9 月,年均蒸发量 1 312 mm,年均日照时间 2 179 h,县境内南北温差大,年平均气温 8.5 ℃,无霜期约 165 d,最大冻土深 45.3 cm。土壤以黄绵土、黑垆土为主,红土、碱土次之。主要农作物有玉米、马铃薯、冬小麦、高粱、筱麦、荞麦等,经济作物主要是胡麻和油菜,经济树种主要是苹果、梨、桃、杏等。

1.2 数据资料来源

资料来源主要以庄浪县 2019 年 3 月实地调查为基础,结合文献资料和各类政府统计数据网站获得,共实地调查葫芦河流域堡子沟、榆林沟、史渠沟、庙龙

沟、双堡子沟、石何沟等重点小流域中型以上淤地坝 32 座, 占全县中型以上淤地坝的 73.0%, 依托淤地坝系调查高标准梯田 128 处, 基本涵盖了庄浪县主要种植模式的高标准梯田。土壤养分数据主要来源于庄浪县农业技术推广中心提供的《庄浪县耕地质量评价数据》, 淤地坝单位库容建造成本来源于庄浪县水土保持局提供的《庄浪县骨干坝除险加固初步设计报告》, 肥料价格和农田收益等经济数据参考国家和甘肃省统计数据。水土流失方程各因子取值借鉴已有研究成果, 如降雨侵蚀力借鉴穆兴民等^[19]的研究成果, 土壤可蚀性因子借鉴高海东等^[20]的研究成果, 坡度因子借鉴 McCool 等^[21]和 Liu 等^[22]提出的坡度因子的计算公式, 坡长因子取值参照 Liu 等^[23]的研究成果, 作物覆盖因子借鉴张岩等^[24]的研究成果。

1.3 生态功能指标体系及评估方法

参考相关研究, 结合黄土区庄浪县高标准梯田的实际情况, 其“三生”功能主要以生产功能和生态功能为主, 而以文化、旅游、休闲为主的生活功能还未充分开发利用, 其服务功能价值较小。根据张文海等^[18]对黄土丘陵区罗玉沟流域内不同土地利用类型单位面积生态服务价值的修正结果, 坡耕地和梯田的气体调节、气候调节、废物处理、生物多样性等生态服务功能价值一致, 1986—1995 年间大量坡耕地转化为梯田, 使得土壤保持、水土保持、水文调节等生态功能价值大幅增加, 而气候调节、除尘降噪、固碳释氧、生物多样性、消纳污水等生态服务功能价值变化较小。因此, 对于黄土丘陵区, 高标准梯田大都远离城区, 坡改梯后单位面积生态服务功能变化主要体现在土壤肥力保持、水土保持、土壤水分涵养等方面。故本文把黄土区高标准梯田生态服务功能界定为土壤肥力保持功能、水土保持功能、土壤水分涵养功能 3 种, 采用机会成本法和影子工程法, 对黄土区高标准梯田生态服务功能进行价值估算。具体评估方法如下:

1.3.1 土壤肥力保持功能 坡耕地实施坡改梯工程后建成高标准梯田, 使耕地质量等级提高, 土壤的结构和性状发生变化, 进而提升了土壤肥力水平。土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾是评价土壤肥力质量的重要指标, 因此, 本研究以耕作层土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量来评估高标准梯田土壤肥力保持功能的价值。根据已有研究^[15-17]成果, 建立物质质量模型(公式 1), 计算高标准梯田土壤中的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾持留量。

$W_i = U_A \times T \times \rho \times C_i$ (i 为 OM、N、P、K) (1)
式中: W_i 为高标准梯田土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的持留量(kg); U_A 为梯田面积(hm^2); T 为高标准梯田土壤耕作层厚度(m); ρ 为梯田土壤容

重(kg/m^3); C_i 为梯田土壤中有有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量(g/kg)。

由于土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾等养分无市场价格, 运用机会成本法按照市场销售含有等量养分的肥料价格进行折算, 以替代梯田土壤中有有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的价格, 最终通过价值量模型(公式 2), 计算高标准梯田土壤中土壤肥力保持功能的价值。

$$V_f = \sum_{i=1}^4 (W_i \times P_i) \quad (i \text{ 为 OM、N、P、K}) \quad (2)$$

式中: V_f 为梯田土壤肥力保持功能的价值(元); P_i 为有机质、碱解氮、有效磷和速效钾折算替代后的价格(元/kg)。

1.3.2 水土保持功能 坡改梯后可以减少 70%~95% 的水土流失, 而高标准梯田水土保持功能更加显著, 可以拦蓄全部的水土流失量^[25]。由于研究区实施了梁、峁、沟、坡综合治理和修建淤地坝工程, 高标准梯田的水土保持功能价值主要体现在控制土壤流失而减少潜在的耕地损失价值和减少土壤养分流失价值 2 个方面, 其减缓下游河道泥沙淤积价值可以忽略不计。

高标准梯田水土保持量可通过坡改梯之前的土壤流失量与坡改梯之后的土壤流失量之差(公式 3)估算。

$$A_u = A_p - A_T \quad (3)$$

式中: A_u 为坡改梯后的水土保持量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); A_p 为坡耕地土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); A_T 为高标准梯田土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)。

本研究运用修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算坡改梯前后土壤侵蚀量的变化, 其表达式为:

$$A = R \times K \times S \times L \times C \times P \quad (4)$$

式中: A 为实际年均土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); R 为降雨侵蚀力因子($(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$); S 为坡度因子; L 为坡长因子; C 为作物覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

高标准梯田因控制土壤流失而减少耕地损失的价值可以运用机会成本法估算其所产生的经济价值(公式 5)。

$$V_1 = A_u \times B \div (\rho \times T) \quad (5)$$

式中: V_1 为减少耕地损失的价值($\text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); B 为梯田单位面积多年年均收益($\text{元}/\text{hm}^2$)。

高标准梯田减少土壤养分流失价值可以运用机会成本法参照土壤肥力保持功能的价值量模型(公式 2)估算其所产生的经济价值(公式 6)。

$$V_2 = \sum_{i=1}^4 (A_u \times C_i \times P_i) \quad (i \text{ 为 OM、N、P、K}) \quad (6)$$

式中: V_2 为减少土壤养分流失价值(元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$))。

因此,高标准梯田的水土保持功能价值可用公式 7 进行估算。

$$V_c=V_1+V_2$$

(7)

式中: V_c 为水土保持功能价值(元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$))。

1.3.3 土壤水分涵养功能 高标准梯田建设过程中,由于坡改梯实施进行了大量的土方移动,改善了土壤的结构和物理性状,使得土壤孔隙度和含水量增大,提高了土壤的蓄水能力,增强了土壤水分的涵养功能,因此,本研究以土壤耕作层饱和含水量来体现土壤水分涵养功能的价值。由于土壤水分在市场无直接价格,本研究依据黄土区梯田土壤水分涵养的主要功能与研究区淤地坝蓄水功能相类似的特点,运用影子工程法以建造同等持水量淤地坝库容成本来代替水分涵养功能的价值。

$$V_w=U_A \times D \times T \times F$$

(8)

式中: V_w 为土壤水分涵养价值(元); D 为淤地坝库容建造成本(元/ m^3); F 为土壤饱和含水量(%)。

表 1 庄浪县高标准梯田土壤肥力保持功能价值

指标	梯田面积 U_A/hm^2	耕作层 厚度 T/m	土壤容重 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	养分含量 $C_i/$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	养分持留量 W_i/kg	养分价格 $P_i/$ (元 $\cdot \text{kg}^{-1}$)	肥力保持的 价值 $V_f/\text{元}$
有机质(OM)	1.00	0.20	1270.00	14.29	36296.60	2.40	87111.84
碱解氮(N)	1.00	0.20	1270.00	0.06	152.40	2.10	320.04
有效磷(P)	1.00	0.20	1270.00	0.02	50.80	3.10	157.48
速效钾(K)	1.00	0.20	1270.00	0.18	457.20	2.80	1280.16
合计					36957.00		88869.52

由表 1 可知,庄浪县高标准梯田土壤中有机质持留量最大,肥力保持的价值最高;有效磷持留量最小,其肥力保持的价值也最少。单位面积梯田每年的养分持留量和肥力保持的价值分别为 36 957.00 kg 和 88 869.52 元,趋势表现为有机质>速效钾>碱解氮>有效磷。

2.2 水土保持功能价值评估

高标准梯田建设由于坡改梯的实施改变了地形条件,使得坡改梯后水土保持功能显著提升,并且其田面、埂坎以及灌排设施等修筑标准高,农作物覆盖相对于坡改梯减轻水土流失的作用可以忽略不计。根据穆兴民等^[19]的研究成果,降雨侵蚀力 R 值取平凉崆峒站多年平均值 1 437 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。高海东等^[20]根据 EPIC 模型对坡耕地和梯田等不同土地利用类型的土壤可蚀性因子进行取样分析,结果表明 K 值变化为 0.034~0.043 ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$,结合研究区土壤有机质和颗粒组成情况综合考虑,本次研究高标准梯田和坡耕地的 K 值分别采用 0.04、0.036 ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ 。研究区高标准梯田田面平整,坡耕地坡度均在 20°以下,故高标准梯田和坡耕地坡度取值分别为

2 结果与分析

2.1 土壤肥力保持功能价值评估

高标准梯田土壤肥力保持主要指能够直接被作物吸收利用的碱解氮、有效磷、速效钾等速效养分和土壤有机质的持留量,不考虑人为施肥等外部养分的输入。庄浪县高标准梯田土壤养分数据采用庄浪县耕地质量评价数据和刘思涵等^[26]对庄浪县梯田土壤养分的评价结果,梯田土壤碱解氮、有效磷、速效钾和有机质的含量分别为 0.06、0.02、0.18、14.29 g/kg;耕作层厚度为 0.2 m,土壤容重采用平均容重 1.27 g/ cm^3 。根据 2019 年农耕季节市场肥料价格调查,有机复合肥(45% OM)为 2.4 元/kg,尿素(46.4% N)为 2.1 元/kg,磷酸二铵(42% P_2O_5)为 3.1 元/kg,氯化钾(62% K_2O)为 2.8 元/kg。运用机会成本法按照上述肥料价格进行折算,以替代梯田土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的价格,可估算出庄浪县高标准梯田土壤肥力保持的价值(表 1)。

0.5°和 20°。根据 McCool 等^[21]和 Liu 等^[22]提出的坡度因子的计算公式,高标准梯田和坡耕地的坡度因子 S 值分别为 0.12 和 6.53。坡长因子取值参照 Liu 等^[23]研究成果,高标准梯田和坡耕地的坡长因子 L 值分别为 0.2 和 0.5。庄浪县高标准梯田主要作物为玉米和马铃薯,坡耕地主要作物为马铃薯和豆类,据此依据张岩等^[24]的研究成果估算高标准梯田和坡耕地作物覆盖因子 C 值分别为 0.38 和 0.49。高标准梯田可以拦蓄坡面 99.0%以上的水土流失量^[25],因此将高标准梯田和坡耕地水土保持措施因子 P 值确定为 0.1 和 1。

运用修正通用土壤流失方程(RUSLE)(公式(4))计算高标准梯田和坡耕地水土流失量(表 2),再根据公式(3)估算高标准梯田水土保持量为 82.71 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。

由于土壤在市场中很少被直接交易,其价格不易确定,故运用机会成本法通过高标准梯田的土壤保持量、耕作层厚度和土壤容重可推算出因控制土壤流失而减少耕地的面积,再根据梯田单位面积多年年均收益可以估算高标准梯田因控制土壤流失而减少耕地损失的经济价值(公式(5))。通过调查庄浪县梯田全膜玉米和马铃薯的产量和产值,本研究高标准梯田单位面积多年

年均收益取均值 28 800 元/hm²。经计算,单位面积高标准梯田因控制土壤流失而减少耕地损失的价值为 937.81 元/(hm²·a)。

高标准梯田的水土保持功能中减少土壤养分流失价值估算采用机会成本法参照土壤肥力保持功能的价值量模型(公式 2)进行。首先通过高标准梯田的土壤保持量和土壤中养分含量推算出高标准梯田

减少土壤养分流失量,再利用土壤养分折算替代后的价格估算出高标准梯田减少土壤养分流失的经济价值(公式 6)。从庄浪县高标准梯田减少土壤养分流失价值表(表 3)可知,单位面积梯田减少土壤的养分持留量和养分流失价值分别为 1 203.43 kg 和 2 893.86 元,以有机质的持留量和肥力保持的价值最高,有效磷持留量和肥力保持的价值最少。

表 2 庄浪县高标准梯田和坡耕地水土流失量

土地利用	降雨侵蚀力 $R/$	土壤可蚀性 $K/$	坡度	坡长	作物	水土保持	水土流失量 $A/$
	($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	S	L	覆盖 C	措施 P	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
高标准梯田	1437	0.040	0.12	0.2	0.38	0.1	0.05
坡耕地	1437	0.036	6.53	0.5	0.49	1	82.76

表 3 庄浪县高标准梯田减少土壤养分流失价值

指标	水土保持量 $A_u/$	养分含量 $C_i/$	养分价格 $P_i/$	养分持留量	减少土壤养分流失价值 $V_2/$
	($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)	W_i/kg	($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
有机质(OM)	82.71	14.29	2.40	1181.93	2836.62
碱解氮(N)	82.71	0.06	2.10	4.96	10.42
有效磷(P)	82.71	0.02	3.10	1.65	5.13
速效钾(K)	82.71	0.18	2.80	14.89	41.69
合计				1203.43	2893.86

高标准梯田的水土保持功能价值由控制土壤流失而减少潜在的耕地损失价值和减少土壤养分流失价值 2 个方面组成,通过公式 7 进行估算,庄浪县高标准梯田单位面积的水土保持功能价值为 3 831.67 元/(hm²·a),远低于土壤肥力保持功能的价值。

2.3 土壤水分涵养功能价值评估

土壤水分是高标准梯田土壤的重要组成部分,降雨通过土壤蓄积和作物吸收以达到对水分的涵养,但是土壤截留和贮存作用对水分的涵养能力明显高于农作物吸收对水分的涵养能力^[14],故本文仅考虑土壤截留和贮存的水分涵养价值。土壤截留和贮存的水分可以用梯田土壤耕作层的饱和含水量来反映,通过高标准梯田土壤的容重和比重,求得研究区土壤饱和含水量为 41.0%。

由于庄浪县修建的淤地坝系其淤积库容都兼有蓄水的功能,与黄土区梯田土壤水分涵养的蓄水功能相类似,本研究运用影子工程法以建造同等持水量淤地坝淤积库容成本来代替土壤贮存水分的价格,进而

估算土壤水分涵养功能的价值(公式 8)。庄浪县淤地坝淤积库容建造成本数据采用淤地坝除险加固初步设计报告中库容和投资的数据,通过对 23 座骨干坝和 9 座中型坝的拦泥库容和总投资进行推算,淤地坝蓄水库容建造成本取平均值 29.56 元/m³。耕作层厚度取 0.2 m,经估算,梯田每年的土壤水分涵养价值为 24 239.20 元/hm²。

2.4 高标准梯田生态服务功能总价值

本研究中,高标准梯田生态服务功能总价值是土壤肥力保持功能、水土保持功能、土壤水分涵养功能的价值综合。高标准梯田每年为人类提供约 119 667.00 kg/hm² 的总物质质量和 114 046.53 元/hm² 的生态服务总价值(表 4)。其中,土壤肥力保持功能的价值量最大,土壤水分涵养功能价值次之,水土保持功能价值最小,分别占生态功能总价值的 77.92%,21.25% 和 0.83%;水土保持功能的物质量最大,土壤肥力保持功能的物质量较小,分别占总物质量的 69.12% 和 30.88%。

表 4 高标准梯田生态服务功能总价值

生态功能指标		总物质的量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生态总价值/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	物质量比例/%	价值比例/%
土壤肥力保持功能	土壤肥力保持价值	36957.00	88869.52	30.88	77.92
	减少耕地损失价值	82710.00	937.81	69.12	0.83
水土保持功能	减少养分流失价值	1203.43	2893.86	—	—
	土壤水分涵养价值	—	24239.20	—	21.25
合计		119667.00	114046.53	100.00	100.00

注:减少养分流失价值是水土保持功能价值的重要组成部分,土壤肥力保持价值和减少养分流失价值的估算指标一致,为避免生态功能总价值重复计算,减少养分流失价值不计入生态功能总价值中。

3 讨论

坡改梯工程具有治理水土流失、保持土壤肥力和改善农耕基础条件等显著的生态服务功能^[25],高标准梯田的建设进一步提升了生态功能的价值,成为黄土高原梯田生态系统中除生产功能外最重要的功能之一。孙文义等^[11]的研究表明,黄土丘陵沟壑区和高塬沟壑区农田生态系统的土壤保持量在 150.00 t/(hm²·a)以上,而河谷平原区和农灌区的土壤保持量与之相比偏低,维持在 150.00 t/(hm²·a)以下。本研究中,高标准梯田水土保持量(82.71 t/(hm²·a))低于黄土高原河谷平原区和农灌区农田生态系统的土壤保持量,说明高标准梯田潜在的水土流失量较小,控制水土流失的功能强。本研究中,每公顷高标准梯田水土保持功能的物质质量最大(83 913.43 kg),价值量却最小(3 831.67 元),主要是因为高标准梯田的水土保持功能价值主要体现在控制土壤流失而减少耕地损失的价值和减少土壤养分流失的价值 2 个方面,由于高标准梯田控制土壤流失的物质质量大(82 710.00 kg)而减少耕地损失价值量小(937.81 元),使得水土保持功能的物质质量最大,价值量却最小。根据减少耕地损失的价值计算模型(公式 5),可说明高标准梯田单位面积多年年均收益较小,目前的传统种植模式还没有最大限度的发挥高标准梯田水土保持功能的价值,还有很大的提升空间和升值潜力,应通过梯田产业结构调整,选择合适的经营发展模式,种植高附加值的农作物和经济树种,大力发展梯田果园、地膜玉米、马铃薯、中药材等产业模式,利用间套作种植模式提高梯田单位面积收益^[27],最大限度发挥高标准梯田的水土保持功能。

近年来,许多学者对土壤肥力保持功能价值进行评估,繆建群等^[17]采用大田试验数据对土壤有机质保持功能进行估算,其价值量为 78 150.00 元/hm²,而李福夺等^[14]采取将绿肥干草按一定比例转换成有机质的方式对土壤有机质保持功能进行估算,其价值量为 2 791.00 元/hm²,说明由于采取的方法不同,其价值量差异较大。本研究采用实测土壤中的养分含量对高标准梯田土壤肥力保持功能进行评估,试验数据具有可靠性,有机质价值量(87 111.84 元/hm²)与采用同种方式估算的繆建群等^[16]的研究结果基本一致。因此,应根据高标准梯田不同服务功能的类型和特点统一标准,有针对性地选取价值量评估方法以减少差异,便于进一步提升价值估算的精确程度^[13]。高标准梯田土壤肥力保持价值占生态功能总价值的 77.92%,说明梯田土壤肥力质量较好,生态系统营养

物质循环体系健康稳定,有利于农耕的可持续发展,因此,高标准梯田的建设可以在一定程度上保持土壤肥力和减少养分流失,为减小因大量施用化肥而造成的土壤污染提供帮助,是减少化肥施用并能够保持土壤肥力的有效途径^[17],值得继续深入研究。

耕地具有肥力保持、土壤保持、水源涵养、环境净化、气体调节、休闲娱乐、文化教育等生态功能,是人类生存最重要的生态景观和生产资源^[28]。由于数据获取困难和定量评估方法的缺失,本研究生态服务功能只选取了土壤肥力保持功能、水土保持功能、土壤水分涵养功能 3 个指标,而对固碳释氧、温室气体排放、生物多样性、废弃物消纳、病虫草害控制等生态功能未能体现,故高标准梯田实际的生态功能的总价值应该更大,这与繆建群等^[16]的观点一致。另外,研究区土壤水分涵养功能生态总价值为 24 239.20 元,由于量纲不统一以及缺少合适的评估方法,暂时无法估算土壤水分涵养功能的物质质量。因此,可以通过建立统一的度量标准和换算法制,将野外试验与现场调查相结合,对难以定量评估的生态功能指标作进一步分析,以形成更为全面的评估模型和方法^[15],这也是今后研究的重点。宋振威等^[29]的研究表明,在西北干旱脆弱的生态环境和相对落后的经济大背景下,生态扶贫、生态旅游等生态效益更加不容忽视。黄土区分布有大面积的梯田,其规模宏大,春夏秋冬不同季节呈现不同的景观,给游人以视觉上的享受,旅游业的兴起又可带动当地的经济发展,对改善梯田的生活功能具有重要意义。然而,由于政府投入不足和农户意愿不高,导致研究区以文化、旅游、休闲为主的生活功能还未充分开发利用,其服务功能价值较小,具有较大升值潜力,仍需进一步挖掘。

4 结论

(1)高标准梯田每年为人类提供了约 119 667.00 kg/hm² 的总物质质量和 114 046.53 元/hm² 的生态服务总价值,其生态功能价值可观。

(2)庄浪县坡耕地和高标准梯田的水土流失量分别为 82.76, 0.05 t/(hm²·a),高标准梯田的水土保持量为 82.71 t/(hm²·a),说明坡耕地改造成高标准梯田对生态服务功能的价值有显著影响。

(3)高标准梯田单位面积的水土保持功能价值为 3 831.67 元/(hm²·a),远低于土壤肥力保持功能价值(88 869.52 元/(hm²·a))和土壤水分涵养功能的价值(24 239.20 元/(hm²·a)),说明高标准梯田水土保持功能还有很大的提升空间和升值潜力,应通过梯田产业结构调整,选择合适的经营发展模式,提高梯田单位面积

收益,最大限度发挥高标准梯田的水土保持功能。

(4)黄土区高标准梯田建设在国民经济发展过程中具有重要的生产、生态和生活功能特征,本研究为高标准梯田的生态功能价值核算提供了较为全面的评估方法,研究结果有利于完善黄土区高标准梯田建设过程中生态功能的价值核算方法,使其最大限度发挥生态效益,同时挖掘潜在的生态功能,提升尚未开发利用的生态价值,从而实现高标准梯田生态系统的可持续发展。

参考文献:

[1] 吴发启,王健,张青峰,等.水土保持图集[M].郑州:黄河水利出版社,2013:50-51.

[2] 周波.甘肃省标准化梯田建设综合技术研究[D].西安:西安理工大学,2017:38-39.

[3] 刘鸣达,黄晓娜,张玉龙,等.农田生态系统服务功能研究进展[J].生态环境,2008,17(2):834-838.

[4] 郭椿阳,高尚,周伯燕,等.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J].生态学报,2019,39(10):3482-3493.

[5] 约日古丽卡斯木,杨胜天,孜比布拉·司马义.新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):260-269.

[6] 戴文远,江方奇,黄万里,等.基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J].自然资源学报,2018,33(12):2098-2109.

[7] 石建华,喻理飞,孙保平.陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究:以吴起县为例[J].水土保持学报,2015,29(6):332-336.

[8] 唐秀美,潘瑜春,程晋南,等.高标准基本农田建设对耕地生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2015,35(24):8009-8015.

[9] 刘春芳,乌亚汗,王川.基于生态服务功能提升的高标准农田建设的分区方法[J].农业工程学报,2018,34(15):264-272.

[10] 高照良,田红卫,王冬,等.水土保持工程措施生态服务功能的物质量化分析[J].生态经济,2012(11):149-153.

[11] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.

[12] 李隆.间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J].中国生态农业学报,2016,24(4):403-415.

[13] 马艳芹,黄国勤.紫云英配施氮肥对稻田生态系统服务功

能的影响[J].自然资源学报,2018,33(10):1755-1765.

[14] 李福夺,尹昌斌.南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究[J].中国生态农业学报,2019,27(2):327-336.

[15] 周志明,张立平,曹卫东.冬绿肥—春玉米农田生态系统服务功能价值评估[J].生态环境学报,2016,25(4):597-604.

[16] 缪建群,杨文亨,杨滨娟,等.崇义客家梯田区生态系统服务功能及价值评估[J].自然资源学报,2016,31(11):1817-1831.

[17] 缪建群,王志强,杨文亨,等.崇义客家梯田生态系统服务功能[J].应用生态学报,2017,28(5):1642-1652.

[18] 张文海,赵阳,余新晓,等.基于 LUCC 的黄土丘陵区生态服务价值动态演变研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):442-452.

[19] 穆兴民,戴海伦,高鹏,等.陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(3):37-43.

[20] 高海东,李占斌,李鹏,等.梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析[J].地理学报,2012,67(5):599-608.

[21] McCool D K, Brown L G, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the ASAE,1987,30(5):1387-1396.

[22] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.

[23] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of American Journal,2000,64(5):226-228.

[24] 张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].生态学报,2001,21(7):1050-1056.

[25] 吴家兵,裴铁璠.长江上游、黄河上中游坡改梯对其径流及生态环境的影响[J].国土与自然资源研究,2002(1):61-63.

[26] 刘思涵,许明祥,吴永斌,等.陇东黄土丘陵区梯田土壤养分评价:以甘肃庄浪县为例[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(9):149-156.

[27] 苏本营,陈圣宾,李永庚,等.间套作种植提升农田生态系统服务功能[J].生态学报,2013,33(14):4505-4514.

[28] 任平,洪步庭,马伟龙,等.基于 IBIS 模型的耕地生态价值估算:以成都崇州市为例[J].地理研究,2016,35(12):2395-2406.

[29] 宋振威,孙美莹,杨荣金,等.宁夏贺兰山东麓葡萄产业生态系统服务功能价值评估[J].应用生态学报,2019,30(3):979-985.